

**PERANCANGAN *ELECTROMYOGRAPH* (EMG) UNTUK
IDENTIFIKASI GERAKAN JARI PADA LENGAN BAWAH
ANTERIOR**

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ELEKTRONIKA

Ditujukan untuk Memenuhi Persyaratan

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

RAYVEN HANJAYA RUSLI

NIM.135060301111070

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

LEMBAR PENGESAHAN
PERANCANGAN *ELECTROMYOGRAPH* (EMG) UNTUK
IDENTIFIKASI GERAKAN JARI PADA LENGAN BAWAH
ANTERIOR

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ELEKTRONIKA

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



RAYVEN HANJAYA RUSLI
NIM.135060301111070

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 27 Juli 2017

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng.Sc.
NIP. 19590304 198903 1 001

Dosen Pembimbing II

Ir. Nurussa'adah, M.T.
NIP. 19680706 199203 2 001



Mengetahui,
Dekan Jurusan Teknik Elektro

M. Riz Muslam, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

PERANCANGAN *ELECTROMYOGRAPH* (EMG) UNTUK IDENTIFIKASI GERAKAN
JARI PADA LENGAN BAWAH ANTERIOR

Nama Mahasiswa : RAYVEN HANJAYA RUSLI

NIM : 135060301111070

Program Studi : TEKNIK ELEKTRO

Konsentrasi : TEKNIK ELEKTRONIKA

Komisi Pembimbing :

Ketua : Dr. Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng.Sc.

Anggota : Ir. Nurussa'adah, M.T.

Tim Dosen Penguji :

Dosen Penguji 1 : R. Arief Setyawan, S.T., M.T.

Dosen Penguji 2 : Dr. Ir. Bambang Siswojo, M.T.

Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Panca Mudjirahardjo, S.T., M.T.

Tanggal Ujian : 19 Juli 2017

SK Penguji : 847/UN.10.F07/SK/2017

Handwritten signatures of the supervisory committee and examiners. The signatures are written in black ink on a white background. The first signature is for the Chairman, Dr. Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng.Sc. The second signature is for the member, Ir. Nurussa'adah, M.T. The third signature is for the first examiner, R. Arief Setyawan, S.T., M.T. The fourth signature is for the second examiner, Dr. Ir. Bambang Siswojo, M.T. The fifth signature is for the third examiner, Dr. Eng. Panca Mudjirahardjo, S.T., M.T. Each signature is placed above a horizontal dotted line.

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 27 Juli 2017



RAYVEN HANJAYA RUSLI

NIM. 135060301111070

RIWAYAT HIDUP

Rayven Hanjaya Rusli, Malang, 8 Juni 1995 putra dari ayah Jo Suharsa Rusli dan Ibu Lanny Ongga. Tinggal di Jalan Danau Sidenreng C3B no 27, Malang. Bersekolah SD tahun 2001-2007 di kota Malang, SMP tahun 2007- 2010 di kota Malang, SMA tahun 2010-2013 di kota Malang, lulus program sarjana jurusan Teknik Elektro konsentrasi Elektronika, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2017.

Malang, Juli 2017

Penulis

RANGKUMAN

Rayven Hanjaya Rusli, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2017, *Perancangan Electromyograph (Emg) Untuk Identifikasi Gerakan Jari Pada Lengan Bawah Anterior*, Dosen Pembimbing: Ponco Siwindarto dan Nurussa'adah.

Electroemyograph (EMG) merupakan peralatan yang digunakan untuk menangkap aktivitas otot manusia. Hasil perekaman sinyal EMG juga telah banyak digunakan sebagai sinyal kendali robot, kursi roda listrik. Hal ini sangat membantu individu yang tidak bisa mengoperasikan kursi roda. Sinyal EMG juga digunakan dalam aplikasi klinis dan biomedis. EMG digunakan sebagai alat diagnostik untuk mengidentifikasi penyakit neuromuskuler. Namun besarnya sinyal yang ditangkap kecil dan rentan terhadap noise.

Pada penelitian ini dirancang instrument EMG dengan menggunakan elektroda permukaan untuk identifikasi pergerakan jari. Pembuatan alat ini terdiri penguat instrumentasi untuk penyadapan sinyal, low pass filter dan high pass filter untuk membatasi frekuensi sinyal informasi yang diinginkan, rangkaian penguat, rangkaian isolasi sebagai proteksi dan board arduino. Hasil berupa grafik akan ditampilkan pada PC menggunakan *software* Matlab. Rangkaian filter yang dirancang menggunakan topologi Sallen Key dan respon Butterworth orde 4. Pengujian instrument dilakukan pada lengan bawah bagian anterior untuk mendapatkan otot yang berperan dalam pergerakan masing-masing jari

Hasil penelitian didapatkan bahwa gain yang didapat pada penguat instrumentasi AD620 adalah 12,21 kali dengan *error* 0,163% dan CMRR 106,33 dB, Rangkaian penguat dapat memberikan sinyal keluaran berada dalam daerah kerja yang diperkenankan pada masukan Arduino. Rangkaian isolasi dengan penguatan 1,00467 dan *error* 0.467%. Rangkaian *low pass filter* yang telah dirancang memberikan frekuensi *cut off* sebesar 506 Hz dengan *error* sebesar 1,2%, serta rangkaian *high pass filter* dengan frekuensi *cut off* 22.1 Hz dengan *error* sebesar 10.5%. Dari 5 letak sadapan yang dilakukan pada lengan bawah bagian anterior didapatkan bahwa otot *extensor policis brevis*, menggerakkan ibu jari menjauhi telapak tangan. Otot *flexor digitorum superficialis* berperan untuk menggerakkan jari tengah dan jari kelingking. Otot *flexor palmaris longus* berperan untuk menggerakkan jari tengah dan jari manis, otot *flexor digitorum superficialis* yang dekat dengan jari kelingking berperan untuk menggerakkan jari telunjuk dan jari kelingking. Otot *flexor carpi ulnaris* berperan untuk menggerakkan jari manis dan jari kelingking. Sehingga hanya didapatkan otot yang hanya menggerakkan ibu jari pada lengan bagian dalam, dan tidak didapatkan otot spesifik yang menggerakkan jari yang spesifik lainnya pada daerah yang disadap

Kata kunci: *Electromyograph*, Elektroda permukaan, *Op-amp*, Filter aktif, Sinyal EMG.

SUMMARY

Rayven Hanjaya Rusli, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Universitas Brawijaya, July 2017, Design of Electromyograph (EMG) To Identify Finger Movement on Anterior Forearms, Academic Supervisor: Ponco Siwindarto and Nurussa'adah.*

Electroemyograph (EMG) is a device used to capture human muscle activity. The EMG signal recording results have also been widely used as robot control signals, electric wheelchairs. This is very helpful for individuals who can not operate a wheelchair. EMG signals are also used in clinical and biomedical applications. EMG is used as a diagnostic tool to identify neuromuscular disease. But the magnitude of the captured signal is small and susceptible to noise.

In this study, designed EMG instrument using surface electrodes to identify finger movement. The making of this tool consists of instrumentation amplifier for signal tapping, low pass filter and high pass filter to limit the desired information signal frequency, amplifier circuit, isolation circuit as protection and arduino board. Graphical results will be displayed on PC using Matlab. The filter circuit is designed using Sallen Key topology and Butterworth 4th order response. The instrument test is performed on the anterior forearm to get the muscles involved in the movement of each finger

Result of research show that gain obtained from AD620 instrumentation amplifier is 12,21 times with error 0,163% and CMRR 106,33 dB, amplifier circuit can give output signal is in work area which permitted at Arduino input. The isolation circuit with 1.00467 gain and 0.467% error. The designed low pass filter provides cutoff frequencies of 506 Hz with an error of 1.2%, and a high pass filter circuit with a cutoff frequency of 22.1 Hz with an error of 10.5%. From 5 location on the forearm of the anterior portion it was found that the extensor policis brevis muscle, moving the thumb away from the palm of the hand. The flexor digitorum superficialis muscle plays a role to move the middle finger and the little finger. Muscles flexor palmaris longus role to move the middle finger and ring finger, flexor digitorum superficialis muscle close to the little finger role to move the index finger and little finger. Muscle flexor muscle ulnaris role to move the ring finger and little finger. So that only the muscles that only move the thumb in the inner arm, and not get specific muscle that moves the other specific finger in the area that is tapped

Keywords: Electroemyograph, Surface electrode, Op-amp, active filter, EMG Signal.

PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat, rahmat, dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan pembuatan alat serta Laporan Skripsi yang menjadi salah satu syarat kelulusan Program S-1 pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya ini dengan baik.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah banyak memberikan bantuan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik, antara lain:

1. Bapak Muhammad Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang
2. Bapak Ir. Ponco Siwindarto, M.Eng.,Sc dan Ibu Ir. Nurussa'adah, MT selaku Dosen Pembimbing I dan II yang telah meluangkan tenaga, waktu, dan pikirannya untuk mengarahkan penulis dalam mengerjakan skripsi ini.
3. Papa dan mama serta keluarga tercinta yang telah memberikan dukungan doa serta moril dan material
4. Segenap dosen dan staff pengajar di Jurusan teknik Elektro Universitas Brawijaya.
5. Teman-teman asisten Laboratorium Elektronika dan teman-teman angkatan 2013 yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Jayadi Wenardo Rusli yang telah membantu banyak hal baik dalam teknis dan non-teknis dan juga dukungan moril serta material.
7. Sahabat terbaik Eric Sebastian, Dimas Krissyda yang banyak memberi dukungan moril.
8. Teman seperjuangan Adam Insan Utama, Yana Wahyuna, Nainaufal Hidayah, dan Novvy Nurdiana Dewi.



9. Semua pihak yang telah mendukung pengerjaan skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak ketidaksempurnaan dalam skripsi ini.

Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat membangun dari pembaca agar dapat menunjang pengembangan dan perbaikan penulisan selanjutnya.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk menambah pengetahuan dan wacana bagi pembaca sekalian.

Malang, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Pendahuluan Sinyal Biolistrik Manusia.....	3
2.1.1 Potensial Istirahat Sel.....	4
2.1.2 Potensial Aksi Sel.....	6
2.1.3 Potensial Pascasipnasik.....	9
2.1.4 Pembangkitan Sinyal Listrik Otot.....	9
2.2 Karakteristik Sinyal EMG.....	10
2.3 Elektrode Biolistrik Ag/AgCl.....	10
2.4 Penguat Pengikut Tegangan (<i>Voltage Follower</i>).....	14
2.5 Penguat Tak Membalik (<i>Non-Inverting</i>).....	14
2.6 Penguat Diferensial.....	14
2.7 Penguat Instrumentasi.....	16
2.8 <i>Right Driven Leg</i> (RLD).....	17
2.9 Filter.....	20
2.9.1 Topologi Filter Sallen-Key.....	21
2.9.2 Filter Low Pass Sallen Key Orde 2.....	23
2.9.3 Filter High Pass Sallen Key Orde 2.....	23
2.9.4 Respon Butterworth.....	24
2.10 Mikrokontroler ATMEGA 328P.....	26
2.11 Arduino.....	27
2.12 Analog <i>Optocoupler</i>	28
BAB III METODOLOGI	31
3.1 Penentuan Spesifikasi Alat.....	31
3.2 Perancangan dan Pembuatan Alat.....	31
3.2.1 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Keras (<i>Hardware</i>).....	31
3.2.1.1 Desain Rangkaian Penguat Instrumentasi.....	32
3.2.1.2 Desain dan Perancangan Rangkaian Right Leg Driver (RLD).....	33
3.2.1.3 Desain dan Perancangan Filter Sallen Key dengan Respon Butterworth Orde 4.....	34



3.2.1.3.1	Desain dan Perancangan <i>Low Pass Filter</i>	34
3.2.1.3.2	Desain dan Perancangan <i>High pass Filter</i>	36
3.2.1.4	Desain dan Perancangan Rangkaian Penguat.....	38
3.2.1.5	Desain Rangkaian Analog Optocoupler	41
3.2.2	Perancangan dan Pembuatan Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	42
3.3	Pengujian Alat	43
3.3.1	Perangkat Keras	43
3.3.2	Perangkat Lunak	44
3.3.3	Pengujian Keseluruhan Sistem	44
BAB IV HASIL DAN ANALISIS		45
4.1	Hasil dan Analisis Pengujian Sub-Sistem	45
4.1.1	Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian Penguat Instrumentasi dan RLD	45
4.1.2	Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian Filter	47
4.2.2.1	Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian <i>Low pass Filter</i>	47
4.2.2.2	Pengujian Rangkaian <i>High pass Filter</i>	49
4.1.3	Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian Penguat Tahap Akhir.....	51
4.1.4	Hasil dan Analisis Pengujian Analog Optocoupler	54
4.1.5	Hasil dan Analisis Pengujian Arduino.....	55
4.2	Hasil dan Analisis Pengujian Seluruh Sistem	56
4.2.1	Hasil dan Analisis Pengujian Otot Penggerak Jari	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		67
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA		69
LAMPIRAN		71

**DAFTAR TABEL**

Nomor	Judul	Halaman
Tabel 2. 1	Daftar Koefisien Persamaan Butterworth	25
Tabel 2. 2	Daftar Letak Dari Pole Persamaan Butterworth.....	25
Tabel 2. 3	Daftar Penyebut Persamaan Butterworth yang Sudah di Faktorisasi.....	26
Tabel 4. 1	Pengujian Gain AD620	46
Tabel 4. 2	Pengujian Gain Common Mode AD620	46
Tabel 4. 3	Perhitungan Nilai CMRR AD620	46
Tabel 4. 4	Tabel Respons Frekuensi Rangkaian Low Pass Filter	48
Tabel 4. 5	Tabel Respons Frekuensi Rangkaian High Pass Filter.....	50
Tabel 4. 6	Hasil Pengujian Penguat non inverting	53
Tabel 4. 7	Hasil Pengujian Penguat Differential	53
Tabel 4. 8	Hasil Pengujian Penguat Keseluruhan	53
Tabel 4. 9	Hasil Pengujian Rangkaian Analog Optocoupler.....	55

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Judul	Halaman
Gambar 2. 1	Ion Potasium Keluar Membran Sel Melalui Difusi Dan Pompa Na-K	4
Gambar 2. 2	Pengaruh Gaya Elektrostatis Yang Disebabkan Perbedaan Kadar Ion	5
Gambar 2. 3	Tahapan Terjadinya Potensial Aksi Sel	7
Gambar 2. 4	Mekanisme pembangkitan gerakan otot	9
Gambar 2. 5	Antarmuka Logam (penghantar) – Elektrolit	10
Gambar 2. 6	Rangkaian Ekuivalen Elektrode Dengan Tubuh.....	13
Gambar 2. 7	Grafik Impedansi Ag/AgCl terhadap frekuensi.....	13
Gambar 2. 8	Op-amp Pengikut tegangan	14
Gambar 2. 9	Op-amp Penguat non inverting.....	14
Gambar 2. 10	Penguat Differensial	15
Gambar 2. 11	Penguat Instrumenstasi	16
Gambar 2. 12	Mode common Pada Penguat Instrumentasi	17
Gambar 2. 13	Rangkaian Right Leg Driver	18
Gambar 2. 14	Rangkaian Ekuivalen DRL.....	19
Gambar 2. 15	Desain rangkaian RLD baru	19
Gambar 2. 16	Grafik keluaran rangkaian RLD baru dengan tambahan C	20
Gambar 2. 17	Macam-Macam Tanggapan Frekuensi Untuk Filter.....	20
Gambar 2. 18	Tanggapan Frekuensi Low Pass Filter Sesuai Praktek.....	21
Gambar 2. 19	Rangkaian umum Sallen-Key orde 2.....	21
Gambar 2. 20	Block diagram Sallen-Key orde 2.....	22
Gambar 2. 21	Low Pass Filter Sallen-Key orde 2	23
Gambar 2. 22	High Pass Filter Sallen-Key orde 2	23
Gambar 2. 23	a) n orde 3 dan b) n orde 5	24
Gambar 2. 24	Pin-pin Atmega 328P.....	27
Gambar 2. 25	Board Arduino Uno berbasis ATmega 328P	27
Gambar 2. 26	IC IL300	28
Gambar 2. 27	Rangkaian Isolasi IL300 dengan tegangan unipolar.....	29
Gambar 3. 1	Blok diagram desain Sistem EMG	31
Gambar 3. 2	Rangkaian Penguat Instrumentasi AD620.....	33
Gambar 3. 3	Desain RLD	33
Gambar 3. 4	Desain RLD dengan tambahan C	34



Gambar 3. 5 Desain Low Pass Filter orde 4.....	36
Gambar 3. 6 Desain High Pass Filter orde 4.....	38
Gambar 3. 7 Rangkaian Penguat non-inverting.....	39
Gambar 3. 8 Rangkaian Penguat Non inverting dengan filter RC.....	40
Gambar 3. 9 Rangkaian Penguat Akhir.....	40
Gambar 3. 10 Rangkaian Pembagi Tegangan.....	40
Gambar 3. 11 Desain Rangkaian Pengkondisi Sinyal.....	41
Gambar 3. 12 Rangkaian Analog Optocoupler.....	42
Gambar 3. 13 Diagram alir Software untuk: Matlab.....	43
Gambar 4. 1 Pengujian a) Mode Differensial b) Mode Common c) RLD.....	45
Gambar 4. 2 Hasil Pengujian RLD.....	47
Gambar 4. 3 Pengujian Rangkaian Low Pass Filter.....	48
Gambar 4. 4 Grafik Karakteristik Low Pass Filter.....	49
Gambar 4. 5 Pengujian Rangkaian High Pass Filter.....	50
Gambar 4. 6 Grafik Karakteristik High Pass Filter.....	51
Gambar 4. 7 Rangkaian Pengujian a) Penguat non inverting b) Penguat differensial c) Keseluruhan.....	52
Gambar 4. 8 Sinyal Keluaran Penguat Dibandingkan Sinyal Masukannya.....	54
Gambar 4. 9 Rangkaian pengujian Analog optocoupler.....	55
Gambar 4. 10 Pengujian Arduino.....	56
Gambar 4. 11 Hasil Serial Transfer Arduino.....	56
Gambar 4. 12 Pengujian Perangkat EMG.....	57
Gambar 4.13 Sinyal EMG ketika lengan digerakkan (a) tanpa membawa beban, (b) membawa beban.....	57
Gambar 4. 14 Letak Elektrode.....	58
Gambar 4. 15 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking di gerakkan dengan elektrode diposisi 1.....	59
Gambar 4. 16 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 2.....	60
Gambar 4. 17 Sinyal EMG ketika digerakkan (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 3....	61
Gambar 4. 18 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 4.....	63



Gambar 4. 19 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 5 64



DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Judul	Halaman
Lampiran 1	Foto Alat dan Skematik	71
Lampiran 2	Listing Program	75
Lampiran 3	Datasheet	79



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Manusia dapat berjalan, berbicara, bergerak, bernafas, jantung yang berdenyut serta berbagai aktifitas hidup di dalam tubuh merupakan peristiwa yang erat hubungannya dengan masalah listrik. Bagian tubuh manusia, khususnya saraf dan otot dalam menjalankan fungsinya erat berhubungan dengan fenomena listrik. Dengan demikian, sesungguhnya manusia merupakan satu sistem biolistrik yang sangat menarik untuk ditelaah.

Otot adalah bagian tubuh manusia yang berfungsi dalam sistem gerak. Otot adalah sebuah jaringan konektif dalam tubuh dengan tugas utamanya kontraksi. Kontraksi otot berfungsi untuk menggerakkan bagian-bagian tubuh dan substansi dalam tubuh.

Kontraksi atau aktivitas otot disebabkan oleh rangsangan potensial listrik dari sel saraf. Sinyal biolistrik otot dapat disadap dan dianalisis sebagai salah satu diagnosis untuk mengetahui aktivitas otot dan kelainan yang terjadi pada otot (Sumartono, 1995).

Elektromiografi (EMG) adalah teknik untuk mengevaluasi dan rekaman aktivitas listrik yang dihasilkan oleh otot rangka. EMG dilakukan menggunakan alat yang disebut *Electromyograph*, untuk menghasilkan rekaman yang disebut Elektromiogram. Sebuah EMG mendeteksi potensial listrik yang dihasilkan oleh sel-sel otot ketika sel-sel diaktifkan (kontraksi dan relaksasi).

Hasil perekaman sinyal EMG juga telah banyak digunakan sebagai sinyal kendali robot humanoid serta kursi roda listrik. Hal ini sangat membantu individu yang tidak bisa mengoperasikan kursi roda. Sinyal EMG juga dapat digunakan dalam aplikasi klinis dan biomedis yaitu sebagai alat diagnostik untuk mengidentifikasi penyakit neuromuskuler. Sinyal EMG juga digunakan sebagai sinyal kontrol untuk perangkat palsu seperti tangan buatan, lengan buatan, dan tungkai bawah buatan.

Berdasarkan penjelasan yang telah dikemukakan maka penulis ingin membuat *electromyography* yang dapat ditampilkan dalam PC agar data dapat disimpan, yang nantinya data tersebut digunakan dalam analisis medis maupun sebagai sarana pembantu untuk kontrol robot ataupun perangkat palsu. Skripsi ini merupakan pengembangan dan evaluasi terhadap skripsi yang ditulis oleh Heri Sumartono pada tahun 1995 dengan judul “*Perencanaan dan Pembuatan Alat Pengukur Aktivitas Otot (Elektromiogram)*”

.Penulis menemukan beberapa kekurangan, dalam penampilan data serta perhitungan filter.

Beberapa desain yang kurang ideal dalam menghadapi mode *common* dan *noise* yang besar.

1.2 Rumusan Masalah

Pada Perencanaan pembuatan ini terdapat beberapa permasalahan dalam pendeteksian sinyal biolistrik otot yang dirumuskan sebagai berikut :

- 1) Bagaimana membuat amplifier yang dapat mengolah dan memperkuat sinyal analog EMG sekaligus meredam noise dengan baik.
- 2) Bagaimana merancang filter dan rangkaian op-amp agar sinyal biolistrik yang diambil sesuai dengan sinyal aslinya dengan *noise* seminimal mungkin.
- 3) Bagaimana grafik sinyal biolistrik otot.
- 4) Otot pada lengan tangan bawah manakah yang berperan dalam menggerakkan masing masing jari.

1.3 Batasan Masalah

Karena luasnya bahasan yang terdapat dalam alat pendeteksi sinyal biolistrik otot ini, maka pembatasan kajian dibuat sebagai berikut :

- 1) Elektrode yang dipakai berjumlah 3 elektrode tempel dan tidak menggunakan elektrode jarum.
- 2) Tidak membahas rangkaian catu daya.
- 3) Arsitektur mikrokontroler tidak dibahas lebih lanjut karena hanya dipakai untuk DAQ (*Data Acquisition*) serta mengirimkan data ke komputer.
- 4) Pengujian otot jari yang dilakukan merupakan gerakan satu jari secara bergantian.
- 5) Tidak membahas *interface* antara mikrokontroler dengan komputer.

1.4 Tujuan

Tujuan penelitian adalah terwujudnya desain rangkaian alat pendeteksi sinyal biolistrik otot dengan mempertimbangkan kualitas sinyal yang disadap, dan dapat ditampilkan dan disimpan, sehingga dapat dianalisis lebih lanjut.

Mendapatkan otot yang berperan secara spesifik untuk setiap gerakan jari pada lengan bawah anterior untuk sarana pembantu kontrol robot atau perangkat palsu

1.5 Manfaat

Penulis berharap agar penelitian ini dapat menjembatani dalam pengembangan lebih lanjut dalam pengolahan hasil EMG, serta pengembangan lebih lanjut dalam kegunaannya untuk kontrol robot ataupun system yang lain.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pendahuluan Sinyal Biolistrik Manusia

Neuron sebagai unit fungsional sistem saraf mempunyai badan sel (*cell body*) yang relatif besar yang mengandung nukleus dan organel lainnya. Ciri neuron yang menonjol adalah adanya penjurulan yang mirip serat, sehingga sel mampu menjangkau jarak jauh untuk menghantarkan informasi (Campbell, 2009). Ada dua jenis penjurulan yang umum; dendrit, yang mengirimkan sinyal dari ujungnya ke seluruh bagian lain neuron; dan akson, yang menghantarkan pesan ke ujung neuron. Akson bisa bercabang, dan masing-masing cabang bisa mencapai ratusan hingga ribuan ujung-ujung khusus yang disebut terminal sipnatik (*synaptic terminal*), yang mengirimkan sinyal ke sel lain dengan melepaskan *messenger* kimiawi (neurotransmitter). Lokasi kontak antara terminal sipnatik dengan sel target (baik neuron atau sel otot, dll) disebut sipnasis.

Sel, sebagai satuan penyusun kehidupan dari tubuh manusia, beradaptasi untuk membentuk suatu fungsi tertentu. Sel dalam tubuh berada dalam media cairan yang disebut cairan ekstraseluler (Campbell, 2009). Cairan ini merupakan lingkungan internal dalam tubuh, yang berisi ion-ion dan nutrisi yang diperlukan untuk kelangsungan hidup sel. Ion yang banyak terdapat dalam cairan ekstraseluler ini adalah sodium (Na^+), klorid (Cl^-), dan bikarbonat. Sedangkan sebuah sel sendiri terdiri dari cairan intraseluler dan organela-organela yang dibungkus suatu membran (Campbell, 2009). Cairan intraseluler yang terdiri dari 5 substansi dasar yaitu air, elektrolit, protein lemak, dan karbohidrat. Di dalam elektrolit terdapat berbagai macam ion, diantaranya yang sangat penting adalah potasium, magnesium, fosfat, sulfat, bikarbonat, serta sejumlah kecil sodium, klorid dan kalsium.

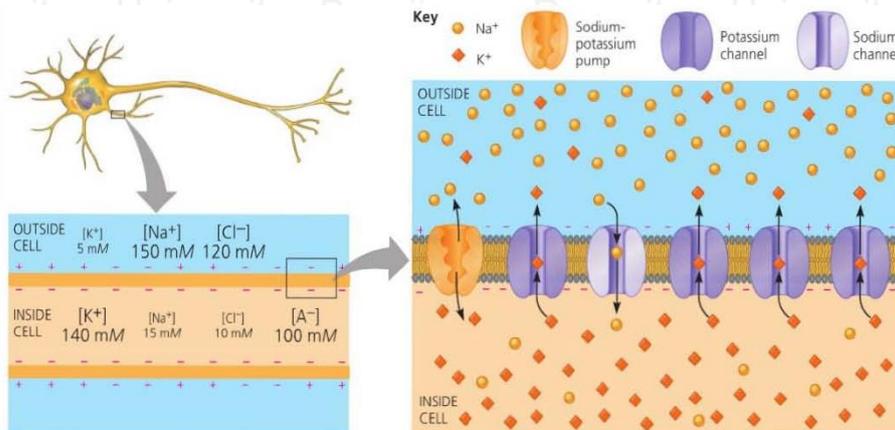
Seperti semua membran biologis, membran plasma memiliki permeabilitas selektif; yakni memungkinkan beberapa substansi dapat melintasinya dengan lebih mudah daripada substansi lainnya. Membran sel neuron bekerja sebagai suatu sekat pemisah yang amat efektif dan selektif antara cairan ekstraseluler dan cairan intraseluler. Hal ini memungkinkan neuron untuk mempertahankan perbedaan konsentrasi ion antara bagian dalam dan luar sel.

Di dalam ruangan ekstraseluler di sekitar neuron terdapat cairan dengan kadar ion-ion natrium (Na^+) dan klorida (Cl^-) yang tinggi, sedangkan di dalam cairan intraseluler kadar ion-ion kalium (K^+) dan protein (Anion) adalah lebih tinggi.

2.1.1 Potensial Istirahat Sel

Sinyal biolistrik dari neuron adalah kombinasi dari potensial istirahat sel, potensial aksi sel serta potensial pascaspantik. Dalam keadaan istirahat (tidak ada impuls), di sisi dalam dan luar membran sel sama-sama terdapat ion-ion potasium dan sodium, tetapi dengan konsentrasi yang berbeda. Gambar 2.1 mengilustrasikan komposisi ion di kedua sisi membran sel. Konsentrasi ion potasium (K^+) di sisi dalam membran sekitar 35 kali lebih tinggi dibandingkan konsentrasi di sisi luar (Webster, 1998). Sebaliknya, konsentrasi ion sodium (Na^+) di sisi luar membran sel sekitar 10 kali lebih tinggi dibandingkan konsentrasi di sisi dalam. Perbedaan kadar ion-ion tersebut disebabkan oleh karena adanya dua faktor :

- 1) Permeabilitas membran neuron yang selektif terhadap ion tertentu. Ion natrium sukar melalui membran plasma neuron, sedangkan ion kalium relatif lebih mudah mengadakan difusi keluar atau masuk neuron.
- 2) Adanya suatu pompa metabolik (pompa Na K) yang dapat secara aktif mengeluarkan ion-ion natrium dari dalam sel. Pompa ini memerlukan energi yang diperoleh dari persenyawaan fosfat yang mengandung energi tinggi, adenosine trifosfat dan keratin fosfat.



Gambar 2. 1 Ion Potasium Keluar Membran Sel Melalui Difusi Dan Pompa Na-K

Sumber : Campbell, Neil A. *Biology*.2009 : 1050

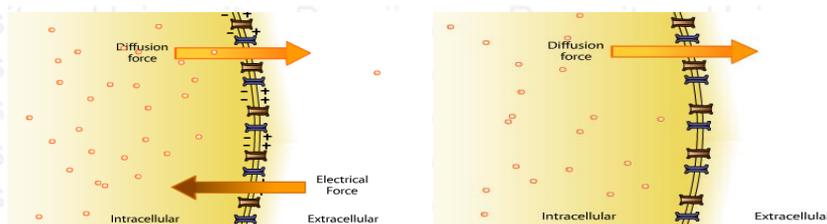
Membran plasma tersusun oleh struktur lipid bilayer. Lapisan lipid ditengah disebut hidrofobik bersifat impermeabel (sukar ditembus) terhadap ion. Satu-satunya cara ion dapat berdifusi menembus membran adalah melewati kanal-kanal protein yang memperbolehkan pergerakan ion dari dalam ke luar dan sebaliknya (Campbell, 2009). Kanal – kanal ini bisa dalam keadaan terbuka atau tertutup. Ketika neuron dalam keadaan istirahat, kebanyakan kanal-kanal ion tertutup. Tetapi beberapa kanal potasium terbuka, dan ion K^+ dapat dengan bebas berdifusi keluar dari sel. Karena hanya sedikit kanal ion Na^+ yang terbuka, maka aliran

ion Na^+ masuk ke dalam intraseluler hanya sedikit. Difusi ion-ion potasium dan sodium menembus membran sel akan mempengaruhi potensial di sisi dalam dan luar membran sel.

Untuk melihat pengaruh kedua jenis ion tersebut pada potensial membran sel, akan dilihat pengaruh masing-masing jenis ion tersebut secara sendiri-sendiri terlebih dahulu, setelah itu baru diperhitungkan interaksi keduanya secara bersamaan. Untuk itu akan dilihat terlebih dahulu pengaruh difusi ion potasium.

Misalkan membran sel hanya permeabel terhadap ion potasium. Karena konsentrasi ion potasium lebih tinggi di sisi dalam sel maka menurut Hukum Fick untuk difusi, ion potasium akan bergerak menembus keluar membran sel. Gerakan ion potasium keluar membran sel ini menimbulkan arus listrik, yang karena terjadinya melalui peristiwa difusi, maka disebut arus difusi. Densitas (*density*) arus difusi bergantung pada gradien konsentrasi.

Keluarnya ion positif potasium dari dalam sel akan meninggalkan muatan negatif (anion) yang sama besar di dalam sel. Hal ini mengakibatkan terjadinya beda potensial antara sisi dalam dan sisi luar sel, dengan sisi dalam lebih negatif dibanding sisi luar (Webster, 1998). Adanya beda potensial ini akan menimbulkan medan listrik seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.2 dengan arah dari luar ke dalam sel.



Gambar 2. 2 Pengaruh Gaya Elektrostatis Yang Disebabkan Perbedaan Kadar Ion

Sumber : <http://www.sumanasinc.com/webcontent/animations/content/electricalsignaling.html>

Medan listrik yang mengarah dari luar ke dalam sel menimbulkan gaya elektrostatis yang mempengaruhi ion-ion yang ada di sekitar membran sel. Ion potasium, karena bermuatan positif, didorong oleh gaya elektrostatis ke arah dalam membran sel. Aliran ion potasium dari sisi luar ke sisi dalam membran sel menimbulkan arus listrik yang disebut arus drift (*drift current*). Densitas arus drift bergantung pada besarnya gradien potensial (medan listrik) di antara kedua sisi membran dan konsentrasi ion, yang berdasarkan hukum partikel drift (Campbell, 2009).

Gaya elektrostatis ini akan melawan gaya difusi pada ion potasium. Interaksi kedua gaya ini suatu saat akan mencapai kesetimbangan, yaitu besarnya gaya elektrostatis yang ditimbulkan oleh adanya beda potensial antara kedua sisi membran sama dengan besarnya gaya difusi (atau dengan kata lain besarnya arus drift sama dengan besarnya arus difusi).

Keadaan setimbang ini akan menghasilkan beda potensial antara kedua sisi membran bernilai konstan. Besarnya beda potensial membran pada saat dicapai kesetimbangan.

Besarnya beda potensial bergantung pada besarnya perbandingan konsentrasi ion potasium antara sisi dalam dan sisi luar membran sel. Untuk komposisi ion potasium manusia dengan normal dan suhu tubuh 310 K (37°C), maka diperoleh potensial membran sekitar -90 mV (sisi dalam lebih negatif dibanding sisi luar membran) (Campbell,2009).

Dalam kenyataannya, yang mempengaruhi nilai potensial membran tidak hanya ion potasium saja, tetapi juga ion sodium. Pengaruh ion sodium pada potensial membran diperoleh dengan menggunakan persamaan Nernst. Jika dimisalkan hanya terdapat ion sodium saja, maka akan diperoleh potensial membran sebesar +62 mV (Campbell,2009).

Ion potasium dan ion sodium secara serentak mempengaruhi besarnya potensial membran sel. Meskipun demikian, pengaruh keduanya bukan merupakan penjumlahan secara langsung kedua potensial membran yang diperoleh secara sendiri-sendiri tersebut. Untuk jenis ion lebih dari satu, ada parameter lain yang juga berpengaruh pada besarnya potensial membran sel, yaitu perbedaan permeabilitas membran terhadap masing-masing ion.

Permeabilitas membran sel terhadap ion potasium jauh lebih besar (sekitar 100 kali) dibandingkan permeabilitas terhadap ion sodium. Hal ini mengakibatkan pengaruh ion potasium lebih dominan dibandingkan ion sodium. Interaksi kedua jenis ion ini dalam menghasilkan potensial membran sel sekitar -86 mV (Webster, 1998).

Disamping transportasi ion secara difusi, terdapat juga transportasi ion secara aktif yang juga mempengaruhi besarnya membran potensial sel. Transportasi ion tersebut adalah Pompa $\text{Na}^+\text{-K}^+$ ($\text{Na}^+\text{-K}^+$ *Pump*) (Campbell, 2009).

Transport ini secara kontinyu memompa 3Na^+ keluar sel dan 2K^+ ke dalam sel. Karena lebih banyak ion positif yang dipompa ke luar sel, maka hal ini akan mengakibatkan tambahan potensial sekitar -4 mV, sehingga potensial akhir membran sel menjadi -90 mV (Fournier,2012).

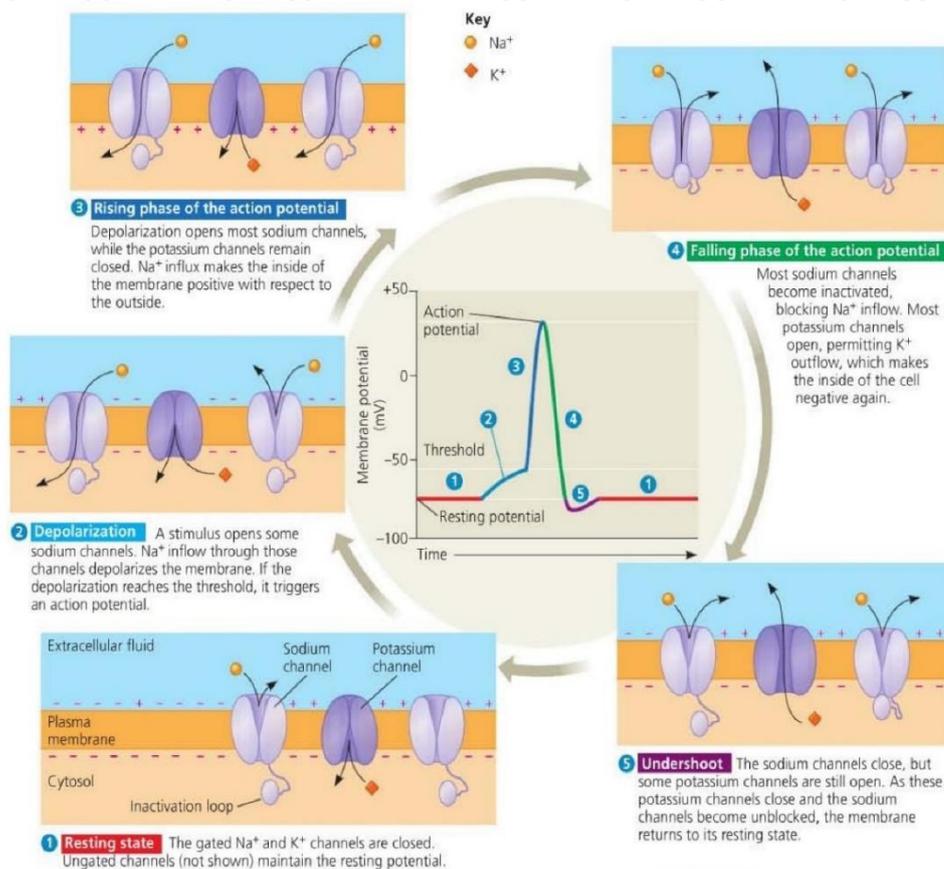
2.1.2 Potensial Aksi Sel

Pada sebuah sel yang dalam keadaan istirahat terdapat beda potensial di antara kedua sisi membrannya. Keadaan sel yang seperti ini disebut keadaan polarisasi. Bila sel yang dalam keadaan istirahat/polarisasi ini diberi rangsangan yang sesuai dan dengan level yang cukup (potensial ambang) maka sel tersebut akan berubah dari keadaan istirahat menuju ke keadaan aktif. Dalam keadaan aktif, potensial membran sel mengalami perubahan dari negatif di sisi dalam berubah menjadi positif di sisi dalam. Keadaan sel seperti ini disebut

dalam keadaan depolarisasi. (Campbell, 2009). Depolarisasi ini dimulai dari suatu titik di permukaan membran sel dan merambat ke seluruh permukaan membran.

Setelah mengalami depolarisasi sempurna, sel selanjutnya melakukan repolarisasi. Dalam keadaan repolarisasi, potensial membran berubah dari positif di sisi dalam menuju kembali ke negatif di sisi dalam. Repolarisasi dimulai dari suatu titik dan merambat ke seluruh permukaan membran sel. Bila seluruh membran sel sudah bermuatan negatif di sisi dalam, maka dikatakan sel dalam keadaan istirahat atau keadaan polarisasi kembali dan siap untuk menerima rangsangan berikutnya.

Aktivitas sel dari keadaan polarisasi menjadi depolarisasi dan kemudian kembali ke polarisasi lagi disertai dengan terjadinya perubahan-perubahan pada potensial membran sel. Perubahan tersebut adalah dari negatif di sisi dalam berubah menjadi positif dan kemudian kembali lagi menjadi negatif. Perubahan ini menghasilkan suatu impuls tegangan yang disebut potensial aksi (*action potential*) (Campbell, 2009). Potensial aksi dari suatu sel akan dapat memicu aktivitas sel-sel lain yang ada di sekitarnya. Berikut akan diuraikan bagaimana proses terjadinya potensial aksi suatu sel yang semula dalam keadaan istirahat seperti diilustrasikan dalam Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tahapan Terjadinya Potensial Aksi Sel

Sumber : Campbell, Neil A. *Biology*.2009 : 1054

Yang berperan dalam proses depolarisasi maupun repolarisasi selama berlangsungnya potensial aksi adalah kanal-kanal sodium dan potasium yang terpicu-tegangan (Campbell, 2009). Masing-masing kanal potasium mempunyai satu gerbang tunggal yang sensitif terhadap perubahan potensial. Dalam keadaan istirahat, gerbang kanal ini tertutup sehingga ion potasium tidak dapat mengalir melalui kanal ini.

Terdapat dua gerbang sodium yang sensitif terhadap perubahan potensial. Satu gerbang aktivasi yang menutup saat fase istirahat dan merespons terhadap depolarisasi dengan membuka secara cepat. Dan satu gerbang inaktivasi yang membuka saat fase istirahat dan merespons terhadap depolarisasi dengan menutup perlahan-lahan. Ketika potensial membran normal yaitu -90 mV, gerbang inaktivasi terbuka tetapi gerbang aktivasi tertutup sehingga menghalangi masuknya ion sodium ke sisi dalam membran melalui kanal tersebut.

Bila karena sesuatu sebab potensial membran di sisi dalam berubah menjadi kurang negatif, yaitu menjadi sekitar -55 mV, maka hal ini akan menyebabkan terjadinya perubahan konformasi dalam gerbang aktivasi, sehingga gerbang tersebut menjadi terbuka (Campbell, 2009). Keadaan ini disebut keadaan teraktivasi, yang menaikkan permeabilitas membran terhadap ion sodium, sehingga ion-ion sodium dapat dengan cepat masuk ke dalam sel melalui kanal ini. Masuknya ion sodium ke dalam sel melalui kanal sodium terpicu-tegangan ini menyebabkan kenaikan potensial membran dengan cepat.

Kenaikan potensial membran sel tersebut menyebabkan gerbang inaktivasi yang semula terbuka menjadi tertutup. Penutupan ini terjadi sekitar $0,1$ ms setelah terbukanya gerbang aktivasi. Berbeda dengan gerbang aktivasi yang membuka dengan cepat, gerbang inaktivasi ini menutup secara lambat. Tertutupnya gerbang inaktivasi mengakibatkan ion sodium tidak lagi dapat mengalir ke dalam sel melalui kanal ini, sehingga potensial membran berubah menuju ke keadaan istirahat. Gerbang inaktivasi yang tertutup tersebut akan tetap tertutup sampai potensial membran kembali ke atau mendekati level potensial istirahat. Oleh karena itu, biasanya kanal sodium terpicu-tegangan tidak dapat terbuka kembali sebelum sel kembali ke keadaan repolarisasi terlebih dahulu (Campbell, 2009).

Pada saat potensial membran naik dari -90 mV menuju nol, pada kanal potasium terjadi pembukaan konformasi gerbang sehingga ion potasium dapat mengalir keluar sel melalui kanal ini. Akan tetapi, karena adanya sedikit penundaan (*delay*), kanal potasium ini terbuka pada saat yang bersamaan dengan mulai tertutupnya kanal sodium. Proses ini dinamakan repolarisasi (Fournier, 2012).

Gerbang saluran potasium juga merupakan penyebab utama terjadinya undershoot atau hiperpolarisasi. Alih-alih kembali ke posisi istirahatnya, gerbang yang relatif bergerak



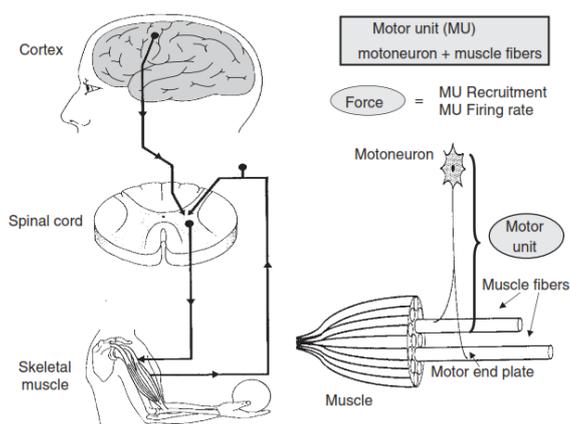
lambat tetap terbuka selama *undershoot*, sehingga ion K^+ tetap mengalir keluar. Hal ini membuat potensial membran menjadi lebih negatif. Selama *undershoot*, baik gerbang aktivasi maupun gerbang inaktivasi saluran sodium menjadi tertutup. Apabila suatu impuls sedang berjalan melalui neuron, maka sel tersebut tidak dapat menghantarkan impuls lainnya sebelum proses repolarisasi terjadi. Fase ini disebut fase refrakter (Campbell,2009).

2.1.3 Potensial Pascasipnasik

Sinapsis adalah persambungan unik yang mengontrol komunikasi antara satu neuron dengan sel lainnya seperti sel kelenjar dan sel otot juga dengan sel neuron lainnya, yang umumnya menghantarkan sinyal dari terminal sinaptik akson ke dendrit atau badan sel berikutnya dalam suatu jalur neuron. Sel yang menghantarkan sinyal disebut sel prasinaptik (*presynaptic cell*) dan sel yang menerimanya disebut sel pascasinaptik (*postsynaptic cell*) (Campbell,2009).

2.1.4 Pembangkitan Sinyal Listrik Otot

Mekanisme pembangkitan sinyal listrik di dalam otot sangat terkait dengan konsep motor unit atau unit motorik. Sistem saraf pusat tersusun dalam tingkatan-tingkatan. Bagian korteks mengirimkan sinyal ke spinal cord (medula spinalis). Spinal cord kemudian meneruskan sinyal tersebut ke motoneuron (sel saraf motorik) yang ada di otot (Moritani dkk., 2005). Perlu diketahui bahwa motoneuron bersama-sama dengan serat-serat otot membentuk *motor unit* (MU). Oleh karena itu, ketika motoneuron diaktifkan oleh sinyal dari spinal cord, serat-serat otot akan diaktifkan pula untuk menghasilkan gerakan yang sesuai dengan perintah otak.



Gambar 2. 4 Mekanisme pembangkitan gerakan otot

Sumber : Moritani .2005: 3.

Jumlah MU dalam sebuah otot berbeda-beda berkisar dari 100 sampai 1000 buah. Selain itu, gaya yang dihasilkan oleh setiap MU juga bervariasi dan berbeda satu sama lain. Bahkan,

perbedaannya bisa mencapai 100 kali lipat atau lebih (Moritani dkk., 2005). Sumber dari sinyal EMG adalah potensial aksi dari MU yang dikenal dengan motor unit action potential (MUAP), yang dibangkitkan selama kontraksi otot. Jumlah MUAP yang diaktifkan terjadi tidak serempak.

2.2 Karakteristik Sinyal EMG

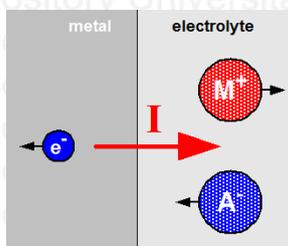
Sinyal EMG mempunyai amplitudonya berkisar dari 100μ - 90 mV, bergantung dari jenis sinyal dan jenis elektrode yang digunakan serta memiliki rentang frekuensi antara 25 Hz sampai beberapa Khz (Webster, 1998).

Jika menggunakan elektrode permukaan maka level sinyal akan rendah dengan amplitude puncak dengan orde 0,1 – 10 mV_{p-p} (Webster, 1998). Noise bisa muncul dari berbagai sumber seperti noise internal dari komponen listrik, pergerakan artefak, ketidakstabilan sinyal, dan noise lingkungan sekitar.

2.3 Elektrode Biolistrik Ag/AgCl

Dalam usaha untuk merekam dan mengukur potensial dari tubuh manusia, diperlukan sebuah antarmuka (*interface*) antara tubuh manusia dan perangkat ukur elektrik. Fungsi antarmuka ini diwakili oleh elektrode bipotensial. Elektrode biopotensial ini harus mempunyai kapabilitas untuk menghantarkan arus antara tubuh dengan perangkat ukur elektrik. Bahwa arus dalam tubuh manusia dibawa oleh ion dalam larutan elektrolit, sedangkan arus dibawa oleh elektron di dalam penghantar logam dalam elektrode.

Ion adalah pembawa muatan listrik. Garam (NaCl) ketika dicampur dengan air akan terbentuk ion Na⁺ dan Cl⁻. Faktanya adalah ion-ion tersebut bebas bergerak dalam larutan. Bila sebuah tegangan diaplikasikan diantara 2 titik larutan, arus akan mengalir dibawa oleh ion-ion yang ada di larutan. Sama halnya dengan arus yang dibawa elektron bebas dalam sebuah metal.



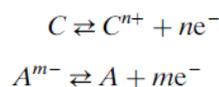
Gambar 2. 5 Antarmuka Logam (penghantar) – Elektrolit

Sumber : Webster, John G . 1998 : 190

Sehingga sering elektrode biomedis menggunakan NaCl maupun KCl sebagai larutan elektrolit. Selain karena larutan tersebut mengandung kandungan ion yang banyak (semakin

banyak ion, semakin bagus konduktansinya), susunan ion-ion Na^+ , K^+ dan Cl^- adalah ion-ion penyusun cairan tubuh sehingga kompatibel.

Susunan antarmuka sebuah elektrode dengan elektrolit seperti pada Gambar 2.5. Arus total yang melewati antarmuka, terdiri dari bagian elektron yang bergerak berlainan arah dengan arus di elektrode, kation (dinyatakan C^+) yang bergerak searah dengan arus di elektrolit, dan anion (dinyatakan A^-) bergerak berlainan arah dengan arus di elektrolit (Togawa, 2011). Proses kimiawi secara umum yang terjadi adalah :



di mana n adalah valensi dari C dan m adalah valensi dari A . Diasumsikan bahwa elektrode memiliki atom penyusun yang sama dengan kation. Reaksi pertama adalah reaksi oksidasi, di mana elektrode akan teroksidasi dan menghasilkan ion kation di dalam elektrolit serta melepaskan elektron yang tetap di dalam elektrode (Webster, 1998).

Reaksi kedua menyangkut anion, bila anion teroksidasi sehingga menghasilkan atom netral di elektrode serta melepas elektron bebas ke dalam elektrode. Perlu dicatat bahwa kedua reaksi tersebut *reversible*, dan reaksi reduksi (dari kanan ke kiri persamaan) juga terjadi. Ketika tidak ada arus yang melewati, reaksi tersebut tetap terjadi. Tetapi laju reaksi oksidasi akan sama dengan reduksi. (Togawa, 2011)

Ketika arus dari elektrode ke elektrolit, seperti Gambar 2.5 reaksi oksidasi yang mendominasi (pengurangan elektron). Sebaliknya, ketika arus mengalir berlawanan arah, reaksi reduksi yang dominan (penambahan elektron). Perbedaan gradasi ion di elektrode dan elektrolit menyebabkan adanya perbedaan potensial.

Ketika sebuah logam dimasukkan ke larutan elektrolit di mana ion yang dikandung memiliki atom yang sejenis dengan logam dan tidak ada arus yang mengalir. Ada dua mekanisme yang terjadi. Yang pertama adalah elektrode akan menghasilkan ion logam (kation) ke dalam elektrolit dan elektron bebas ke dalam elektrode. Atau malah ion dalam elektrolit akan berkombinasi dengan elektrode logam, di mana akan mengurangi elektron bebas di elektrode dan mengurangi kation di larutan.

Konsekuensinya, terjadi akumulasi muatan di *interface* antara elektrode dengan elektrolit menimbulkan *electrical double layer* menggambarkan struktur di *interface* karena adanya akumulasi dan pemisahan muatan yang selalu terjadi bila sebuah elektrode dicelupkan di larutan elektrolit. Muatan berlebih di permukaan elektrode terkompensasi oleh akumulasi kelebihan ion bermuatan kebalikan di dalam larutan. Jumlah

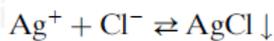


muatan adalah fungsi dari potensial elektrode. Struktur ini mempunyai perilaku seperti kapasitor. Anggap saja ion logam lebih mempunyai kecenderungan untuk berpindah ke larutan; permukaan logam menjadi bermuatan lebih negatif karena akumulasi elektron yang tertinggal, sementara itu lapisan elektrolit akan menjadi lebih positif karena kelebihan ion logam. Adanya perbedaan potensial ini menyebabkan proses tersebut melambat dan akan berhenti di titik keseimbangan. Perbedaan potensial di titik keseimbangan ini disebut *Half Cell Potential*. Disebut *half cell potential* karena untuk mengukur potensial elektrode membutuhkan elektrode referensi. Sehingga dibutuhkan standar dari potensial *Half-Cell*. Elektrode hidrogen ditetapkan sebagai standar dari *half – cell potential* (Webster, 1998).

Bila sebuah logam dicelupkan ke larutan elektrolit dan dimisalkan timbul arus listrik, maka *half cell potential* yang diamati akan berubah ketika diukur pada titik keseimbangan (*equilibrium*). Hal ini disebut *overpotential*. Overpotensial merepresentasikan energi ekstra (energi yang hilang dalam bentuk panas) yang dibutuhkan untuk mendorong reaksi elektrode sesuai laju arus (kerapatan arus). *Overpotential* akan meningkat sesuai dengan kerapatan arusnya. Reaksi redoks antara elektrode-elektrolit yang cepat akan membutuhkan nilai *overpotential* yang kecil, sedangkan reaksi yang berjalan lambat membutuhkan *overpotential* yang besar juga. Proses ini disebut polarisasi dari elektrode. Elektrode polarisasi mempunyai ciri seperti kapasitor, tidak melewatkan arus DC dan berfungsi seperti filter frekuensi rendah.

Ada dua jenis elektrode yang mungkin dipakai dalam biopotensial: elektrode yang terpolarisasi ideal dan elektrode non-polarisasi ideal (Webster, 1998). Elektrode yang terpolarisasi ideal mengalami proses polarisasi dan berlaku seperti kapasitor, tidak ada arus yang benar-benar lewat di dalamnya, tetapi arus *displacement*. Elektrode non-polarisasi ideal mempunyai sifat yang berbeda dengan elektrode terpolarisasi ideal, karena dapat dengan mudah melewatkan muatan menembus *double layer*, dan tidak terjadi *overpotential*.

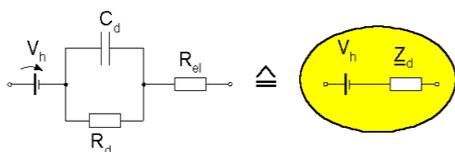
Elektrode Ag/AgCl adalah salah satu contoh elektrode yang mendekati perilaku elektrode non-polarisasi ideal dan mudah difabrikasi di laboratorium. Tersusun atas logam perak yang dilapisi lapisan tipis larutan yang sedikit larut dengan komposisi ion logam dan anion yang sesuai yaitu AgCl (garam perak klorida berbentuk kristal). Semua struktur tersebut akan dicelupkan ke dalam larutan elektrolit dengan konsentrasi anion yang tinggi. Reaksi kimia yang terjadi bila elektrode Ag/AgCl ini dicelupkan di larutan elektrolit yang mempunyai anion Cl⁻.



Setelah reaksi pertama terjadi, setelah pembentukan ion Ag^+ , ada kecenderungan dari anion Cl^- di larutan untuk membentuk AgCl . Karena AgCl sangat sedikit larut dalam air, sebagian besar hasil bentukan AgCl mengendap di elektode Ag dan berkontribusi terhadap deposit AgCl . Laju pengendapan perak klorida dinyatakan dengan K_s (Webster, 1998).

Dapat dilihat bahwa aktivitas ion Cl^- tinggi dan tidak berkaitan dengan oksidasi Ag^+ , di mana oksidasi ini disebabkan adanya arus. Potensial *Half Cell* nya tergolong stabil bila dicelupkan ke larutan elektrolit yang mengandung Cl^- .

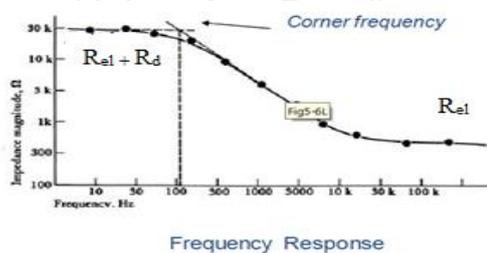
Bila dinyatakan dalam bentuk rangkaian ekivalen, elektode yang terpolarisasi ideal mewakili kapasitor, sedangkan elektrode non-polarisasi ideal menyatakan resistor. Dalam prakteknya tidak ada keadaan ideal. Walaupun menggunakan elektode non-polarisasi, tapi terkadang efek polarisasi dapat muncul. Seperti dijelaskan sebelumnya, polarisasi juga dipengaruhi oleh suhu dan laju reaksi yang cepat atau lambat. Sehingga rangkaian ekivalennya pada Gambar 2.6:



Gambar 2. 6 Rangkaian Ekivalen Elektode Dengan Tubuh

Sumber : Webster, John G . 1998 : 203

Di mana V_h menyatakan *half-cell potential*, dan R_{el} menyatakan hambatan elektrolit. Sebuah eksperimen yang terlihat pada Gambar 2.7 menyatakan impedansi Ag/AgCl ini bervariasi secara signifikan terhadap frekuensi < 100 Hz (Webster, 1998).



Gambar 2. 7 Grafik Impedansi Ag/AgCl terhadap frekuensi

Sumber : Webster, John G . 1998 : 205

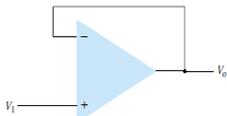
Adanya *half-cell potential* V_h (tegangan DC) terkadang lebih besar dibanding sinyal AC yang diukur. Maka digunakan penguat instrumentasi untuk mengatasi V_h . (Fournier, 2012).

2.4 Penguat Pengikut Tegangan (*Voltage Follower*)

Penguat pengikut tegangan merupakan aplikasi dari operational amplifier di mana diberikan umpan balik negative dan mempunyai *gain* sebesar satu, maka

$$V_{in} = V_{out} \quad (2.1)$$

Op-amp pengikut tegangan ini mempunyai impedansi masukan yang besar, keluaran tidak mengalami perubahan fasa maupun polaritas. Penguat pengikut tegangan dapat mengurangi *loading effect*.

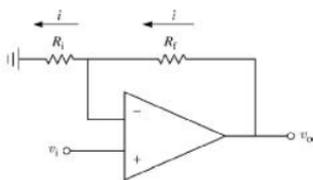


Gambar 2. 8 Op-amp Pengikut tegangan

Sumber : Clayton, George & Winder, Steve . Operational Amplifiers . 2003 : 83

2.5 Penguat Tak Membalik (*Non-Inverting*)

Penguat tak membalik merupakan penguat di mana keluaran sinyal tidak terdapat perubahan polaritas maupun fasa terhadap sinyal masukan. Penguat tak membalik dijelaskan menurut gambar 2.9



Gambar 2. 9 Op-amp Penguat non inverting

Sumber : Webster, John G . 1998: 97

Arus akan mengalir dari V_o menuju ke ground. Tegangan pada terminal negatif op-amp akan sama dengan V_i karena beda tegangan pada kedua terminal op-amp adalah 0. Maka didapatkan:

$$\frac{V_i}{R_i} = \frac{V_o - V_i}{R_f}$$

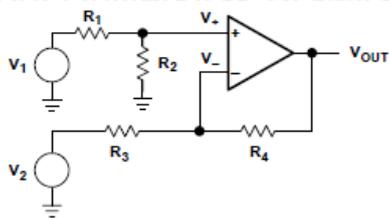
Penguatan yang didapatkan dari rangkaian pada gambar 2.9 dapat dirumuskan menjadi:

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (2.2)$$

2.6 Penguat Diferensial

Rangkaian penguat masukan diferensial biasanya digunakan untuk memperkuat atau sebagai *buffer* sinyal- sinyal diferensial, seraya menolak sinyal-sinyal mode *common*.

Penguat differensial seperti pada Gambar 2.10 memiliki sinyal differensial yang muncul di antara dua terminal op-amp ketika tegangan pada salah satu terminalnya meningkat.



Gambar 2. 10 Penguat Differensial

Sumber : Mancini, Ron . *Op-Amp For Everyone : Design Reference* .2002 :3.7

Sinyal mode *common* adalah sinyal di mana tegangan pada kedua terminal op-amp bertambah atau berkurang secara bersama-sama. Bila kita gunakan prinsip super posisi, jika sebuah v_1 diganti oleh sebuah hubung singkat, maka v_2 adalah masukan untuk penguat inverting dengan rumusan

$$v_{out1} = -\frac{R_4}{R_3} v_2$$

Kemudian, bila v_2 dihubung-singkatkan, maka v_1 adalah masukan dari op-amp non-inverting . Tetapi dengan adanya konfigurasi pembagi tegangan :

$$v_+ = v_1 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

maka keluaran dari op amp adalah :

$$v_{out2} = \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) v_+$$

dengan $R_1=R_3$ dan $R_2=R_4$, persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi

$$v_{out2} = \left(\frac{R_3}{R_3} + \frac{R_4}{R_3} \right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) v_1 = \frac{R_3 + R_4}{R_3} \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_1 = \frac{R_4}{R_3} v_1$$

dengan rumus op-amp differensial dasar $v_{out} = v_+ - v_-$, maka

$$v_{out} = v_{out2} - v_{out1} = \frac{R_4}{R_3} (v_1 - v_2) \quad (2.3)$$

Apabila $v_1=v_2$ maka tegangan keluaran akan sama dengan nol. Cara yang diterapkan yaitu dengan menghubungkan kedua terminal masukan 1 dan 2 menjadi satu dengan sebuah sumber tegangan v_{cm} (tegangan masuk mode *common*). Tegangan keluaran akan sama dengan nol selama perbandingan resistor R_4 dengan R_2 dan R_1 dengan R_3 adalah sama. Sifat penguat differensial inilah yang memungkinkan suatu sinyal kecil diambil dari sinyal yang lebih besar. Hal ini dilakukan dengan cara yaitu sinyal yang lebih besar (atau yang tidak dikehendaki) merupakan tegangan masukan mode *common* dan sinyal yang lebih kecil

adalah tegangan masukan mode differensial. Sehingga keluaran penguat differensial hanya berisi tegangan masuka differensial yang diperkuat.

Syarat utama yang harus dipenuhi oleh sebuah rangkaian penguat masukan differensial adalah harus memiliki rasio penolakan mode *common* (CMRR) yang tinggi. Sebuah rangkaian differensial ideal akan memiliki CMRR yang nilainya tidak terbatas.

$$CMRR (dB) = 20 \log \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \quad (2.4)$$

dengan A_{dm} = penguatan mode differensial; A_{cm} = penguatan mode bersama.

2.7 Penguat Instrumentasi

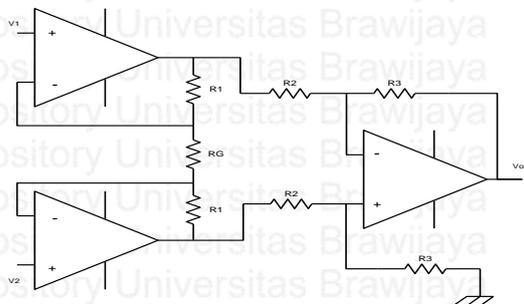
Penguat instrumentasi adalah penguat differensial yang dilengkapi penyangga sinyal masukannya, mempunyai impedansi masukan yang tinggi, biasanya 10^9 ohm atau lebih (Coughlin, 1982). Tidak seperti op-amp biasa, di mana penentuan *gain* umpan balik ditentukan oleh resistor eksternal yang dihubungkan dari output ke masukan pembalik atau non-pembalik, op-amp instrumentasi menggunakan resistor internal sebagai umpan balik yang terisolasi dari terminal masukan.

$$V_{out} = \left(\frac{2R_1}{R_G} + 1 \right) \left(\frac{R_3}{R_2} \right) (V_2 - V_1) \quad (2.5)$$

Penguat instrumentasi pada Gambar 2.11 harus mempunyai CMRR sebesar mungkin untuk menolak sinyal-sinyal mode *common*.

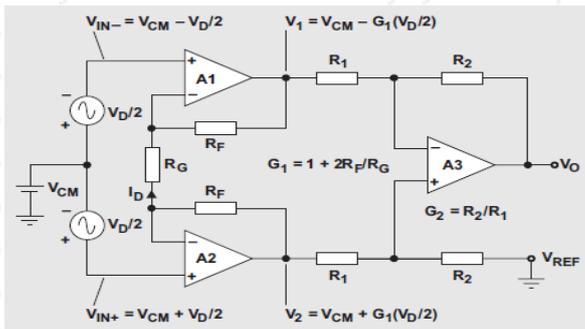
$$CMRR (dB) = 20 \log \frac{A_{dm}}{A_{cm}} \quad (2.6)$$

dengan A_{dm} = penguatan mode differensial; A_{cm} = penguatan mode bersama. Gambar 2.12 menunjukkan rangkaian lengkap baik tegangan differensial maupun *common mode* nya.



Gambar 2. 11 Penguat Instrumenstasi

Sumber : Coughlin, Robert F & Driscoll, Frederick F . 1982 : 168



Gambar 2. 12 Mode common Pada Penguat Instrumentasi

Sumber : Kugelstadt, Thomas 2005 :25

V_D adalah tegangan diferensial, V_{CM} dinyatakan sebagai masukan mode *common* yang muncul di kedua masukan, didefinisikan sebagai rata-rata V_{IN+} dan V_{IN-} .

$$V_{CM} = \frac{V_{IN+} + V_{IN-}}{2} \text{ dan } V_D = V_{IN+} - V_{IN-}$$

V_{IN+} dan V_{IN-} dinyatakan sebagai

$$V_{IN+} = V_{CM} + \frac{V_D}{2} \text{ dan } V_{IN-} = V_{CM} - \frac{V_D}{2}$$

Op-amp A_1 dan A_2 berguna untuk mem-*buffer* tegangan differensial V_D melintasi resistor yang dapat disetel untuk *gain* yaitu R_G , menghasilkan arus masukan I_D .

$$I_D = \frac{V_{IN+} - V_{IN-}}{R_G} = \frac{V_D}{R_G}$$

Tegangan keluaran A_1 dan A_2 sedemikian rupa sehingga :

$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_D}{2} - I_D R_F \text{ dan } V_2 = V_{CM} + \frac{V_D}{2} + I_D R_F$$

dengan mengganti persamaan arus I_D dengan rumusan V_1 dan V_2 :

$$V_1 = V_{CM} - \frac{V_D}{2} G_1 \text{ dan } V_2 = V_{CM} + \frac{V_D}{2} G_1, \text{ di mana } G_1 = 1 + 2 \frac{R_F}{R_G}$$

Persamaan terakhir menunjukkan hanya komponen sinyal diferensial $V_D/2$, yang diperkuat oleh input *gain* G_1 , sedangkan tegangan mode *common*, V_{CM} akan melewati tahapan penguat penyangga dengan *gain* sama dengan 1. Konfigurasi op-amp differensial A_3 , akan mengurangi V_1 dari V_2 dan diperkuat oleh *gain* G_2 .

$$V_O = (V_2 - V_1)G_2 \text{ di mana } G_2 = \frac{R_2}{R_1} \text{ sehingga penguatan total dari } \frac{V_O}{V_D} = G_1 G_2 = G_{TOTAL}$$

2.8 Right Driven Leg (RLD)

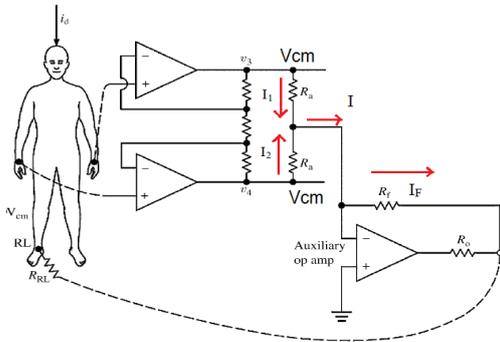
Rangkaian ini umum dipakai dalam EKG. Digunakan untuk mengurangi sinyal mode *common* akibat interferensi dengan line power 50 Hz yang terdistribusi ke tubuh pasien.

Rangkaian ini ditempatkan pada elektrode referensi, alih-alih hanya sebagai referensi, di mana rawan untuk disusupi tegangan mode *common*, RLD digunakan untuk mengurangi tegangan mode *common* dan mengembalikannya sebagai tegangan referensi (Webster,

1998). Seperti pada Gambar 2.13, bagian input stage dari op-amp instrumentasi dengan *gain*

$G = 1 + 2 \frac{R_F}{R_G}$, hanya memperkuat sinyal diferensial, tidak akan memperkuat sinyal *common mode* (dengan *gain*=1).

Ujung-ujung keluaran input stage memiliki sinyal v_{cm} yang tidak diperkuat oleh rangkaian sebelumnya.



Gambar 2. 13 Rangkaian Right Leg Driver

Sumber : Webster, John G . 1998: 267

Dengan memakai 2 resistor R_a , maka arus yang mengalir yaitu :

$$i_1 = \frac{v_{cm}}{R_a} \text{ dan } i_2 = \frac{v_{cm}}{R_a} \text{ sehingga } i = i_1 + i_2 = 2 \frac{v_{cm}}{R_a}$$

Karena tidak ada arus yang mengalir ke masukan V_- dan V_+ (op-amp ideal) *auxiliary* op-amp, maka $i_F = i$. Dengan rangkaian ekivalen pada Gambar 2.14, dapat dilihat dengan memakai hukum arus :

$$2 \frac{v_{cm}}{R_a} + \frac{v_o}{R_F} = 0$$

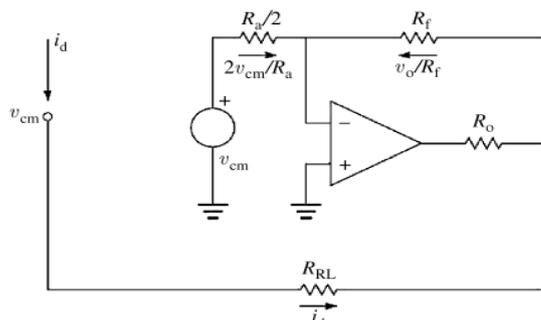
Di mana $v_o = -\frac{2R_F}{R_a} v_{cm}$, tanda negatif disini menunjukkan bahwa polaritas keluaran op-amp lebih negatif daripada v_{cm} dari tubuh. Karena arus mengalir dari potensial tinggi ke rendah dari v_{cm} tubuh menuju keluaran op-amp, maka didapatkan hubungan :

$$v_{cm} = R_{RL} i_d + v_o$$

Dengan mengombinasikan persamaan sebelumnya, didapatkan hubungan :

$$v_{cm} = \frac{R_{RL} i_d}{1 + 2R_F/R_a} \quad (2.7)$$

Hal ini menunjukkan dengan adanya rangkaian umpan balik negatif dari op-amp, nilai v_{cm} akan bergantung dari nilai R_F , semakin besar nilai R_F maka akan semakin besar pembaginya, sehingga akan semakin kecil nilai v_{cm} .

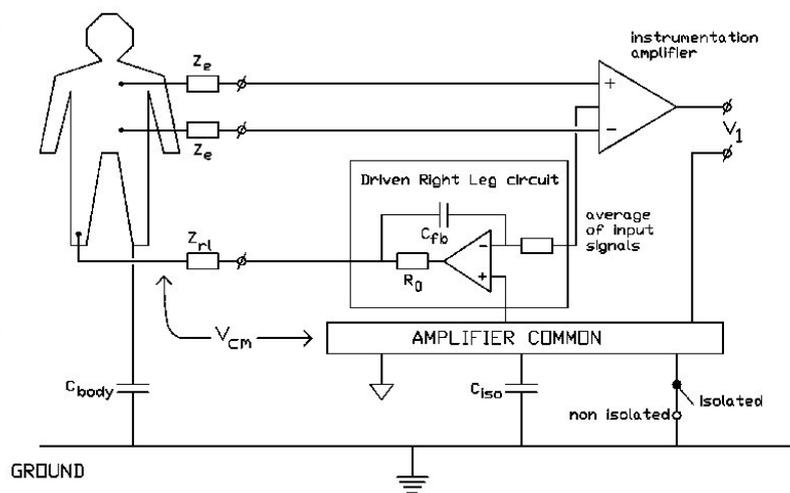


Gambar 2. 14 Rangkaian Ekivalen DRL

Sumber : Webster, John G . 1998: 268

Sebuah resistor dipasang seri dengan keluaran op-amp inverting sebagai pembatas arus untuk *safety* bila terjadi *short circuit*. Nilai R_o yang bisa dipakai sekitar 10 K Ω hingga 10 M Ω .

Pengembangan serta evaluasi desain RLD yang lama menghasilkan desain RLD baru Rangkaian pada Gambar 2.14 mampu menghasilkan osilasi bila terdapat sinyal *noise* berfrekuensi tinggi yang masuk pada tegangan rerata. Sinyal *noise* tersebut dapat diumpan-balikkan ke tubuh pasien yang sangat mungkin menghasilkan osilasi kontinu pada op-amp sampai amplitudonya mencapai *rail* tegangan *supply*. Hal ini merupakan keterbatasan *roll-off gain* op-amp yang baru berkurang pada orde megahertz, yang mengakibatkan semua sinyal *noise* berfrekuensi tinggi dapat dikuatkan (Benning, 2003).

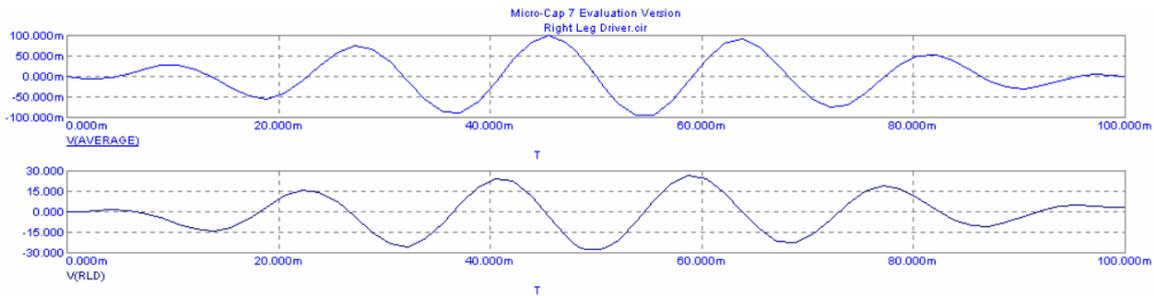


Gambar 2. 15 Desain rangkaian RLD baru

Sumber : <https://www.biosemi.com/publications/artikel3.htm>

Desain baru pada Gambar 2.15 dengan menambahkan kapasitor C_{fb} 1nF pada *feedbacknya* untuk menghindari osilasi. Keluaran dari RLD akan tetap bernilai negatif, namun dapat menghindari terjadinya osilasi kontinu pada frekuensi tinggi.

Sebuah kapasitor C_2 dipasangkan secara paralel pada R_0 digunakan untuk menambahkan impedansi total sehingga akan semakin aman bila terjadi *short circuit*. Dari percobaan mendalam, antara C_1 dan C_2 harus sama sehingga dapat bekerja normal pada frekuensi rendah. (Benning, 2003).

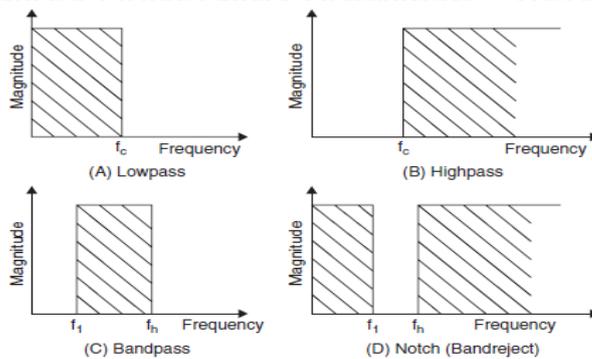


Gambar 2. 16 Grafik keluaran rangkaian RLD baru dengan tambahan C

Sumber : Benning, 2003;27

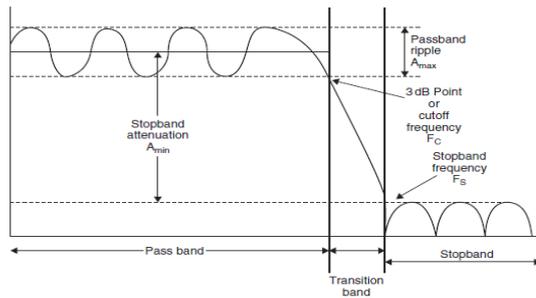
2.9 Filter

Filter adalah rangkaian yang dirancang untuk melewatkan atau meloloskan frekuensi tertentu, dan memblokir atau memperlemah frekuensi tertentu. *Filter* memiliki aplikasi yang sangat luas dalam rekayasa elektronika serta merupakan elemen yang sangat penting dalam banyak sistem komunikasi dan instrumentasi di mana proses pemisahan dari sinyal-sinyal yang diinginkan dan tidak diinginkan, termasuk di dalamnya adalah sinyal-sinyal pengganggu *noise*.



Gambar 2. 17 Macam-Macam Tanggapan Frekuensi Untuk Filter

Sumber : Zumbahlehn, Hank . 2008 : 584



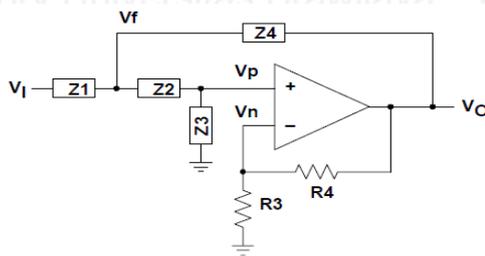
Gambar 2. 18 Tanggapan Frekuensi Low Pass Filter Sesuai Praktek

Sumber : Sumber : Zumbahlehn, Hank . 2008 : 584

Ada empat jenis filter berdasarkan tanggapan frekuensi yaitu : low pass filter, *high pass filter*, *band pass filter*, dan *band elimination filter* (sering disebut *band-reject*). Karakteristik dari respons frekuensi yang ideal diperlihatkan dalam Gambar 2.17. Frekuensi *cut-off* (f_c) didefinisikan sebagai frekuensi pada saat penguatan daya turun menjadi sebesar 0,707 atau berkurang 3 dB (Zumbahlehn, 2008). Sebagai contoh untuk respons frekuensi *low pass filter* yang sesuai praktek ada di Gambar 2.18. Adanya kemiringan setelah f_c di daerah *transition band*, menunjukkan roll off *gain* sebesar 20dB/dekade untuk filter orde tunggal. Setiap kenaikan orde, *roll off gain* akan naik sesuai kelipatan orde (Zumbahlehn, 2008).

2.9.1 Topologi Filter Sallen-Key

Salah satu topologi *filter* pada Gambar 2.19 untuk orde tinggi (lebih dari 1) yang sering dipakai adalah topologi sallen key (Texas Instrument, 2002).



Gambar 2. 19 Rangkaian umum Sallen-Key orde 2

Sumber : Texas Instrument . Analysis of Sallen Key Architecture .2002 : 2

Di titik f :

$$\frac{V_f - V_i}{Z_1} + \frac{V_f - V_p}{Z_2} + \frac{V_f - V_o}{Z_4} = 0$$

$$V_f \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_4} \right) = V_i \left(\frac{1}{Z_1} \right) + V_p \left(\frac{1}{Z_2} \right) + V_o \left(\frac{1}{Z_4} \right)$$

Di titik p :

$$\frac{V_f - V_p}{Z_2} + \frac{0 - V_p}{Z_3} = 0$$

$$V_f = V_p \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right)$$

Substitusi persamaan dengan persamaan

$$V_p = V_i \left(\frac{Z_2 Z_3 Z_4}{Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_3 + Z_2^2 Z_4 + Z_2^2 Z_1} \right) + V_o \left(\frac{Z_2 Z_3 Z_1}{Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_3 + Z_2^2 Z_4 + Z_2^2 Z_1} \right)$$

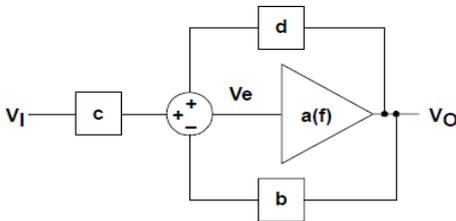
Di titik n :

$$V_n = V_o \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Dengan memisalkan $a(f)$ = open-loop gain , $b = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$,

$$c = \left(\frac{Z_2 Z_3 Z_4}{Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_3 + Z_2^2 Z_4 + Z_2^2 Z_1} \right), d = \left(\frac{Z_2 Z_3 Z_1}{Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_1 Z_2 Z_3 + Z_2^2 Z_4 + Z_2^2 Z_1} \right),$$

dan $V_e = V_p - V_n$, bentuk dari sallen-key dapat direpresntasikan dalam blok diagram pada Gambar 2.20.



Gambar 2. 20 Block diagram Sallen-Key orde 2

Sumber : Texas Instrument . Analysis of Sallen Key Architecture .2002 : 3

Dari bentuk blok diagram pada gambar 2.20 dapat dicari dengan mudah fungsi transfer nya. $V_e = a(f)V_n$ serta $V_e = cV_i + dV_o - bV_o$, maka fungsi transfer nya

$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{c}{b} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{a(f)b} - \frac{d}{b}} \right)$$

Dengan mengamsuksikan $a(f)b$ sangat besar daripada frekuensi operasi , $\frac{1}{a(f)b} \approx 0$, sehingga transfer idealnya menjadi :

$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{c}{b} \right) \left(\frac{1}{1 - \frac{d}{b}} \right)$$

Dengan memisalkan $\frac{1}{b} = K$, $c = \frac{N1}{D}$, $d = \frac{N2}{D}$, di mana N1, N2 dan D adalah pembilang dan penyebut, sehingga :

$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{K}{\frac{D}{N1} - \frac{K \cdot N2}{N1}} \right)$$

Dengan memasukan bentuk impedansi, maka fungsi transfer nya menjadi

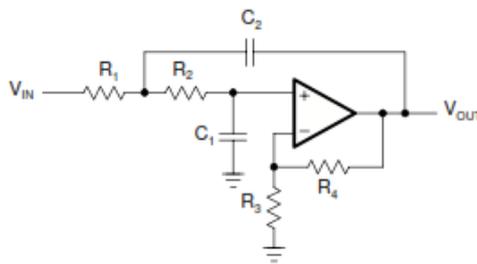
$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{K}{\frac{Z_1 Z_2}{Z_3 Z_4} + \frac{Z_1}{Z_3} + \frac{Z_2}{Z_3} + \frac{Z_1(1-K)}{Z_4} + 1} \quad (2.8)$$

Dengan K menyatakan penguatan op-amp. Rumus *transfer function* ini dapat diaplikasikan untuk berbagai macam jenis filter.

2.9.2 Filter Low Pass Sallen Key Orde 2

Dengan mengganti komponen Z pada Gambar 2.21 dengan komponen R dan C seperti pada Gambar dan memasukkannya dalam persamaan 2.8, maka akan didapat rumus fungsi alih nya (Zumbahlehn, 2008) :

$$H(s) = \frac{V_0}{V_I} = \frac{K}{s^2(R_1 R_2 C_1 C_2) + s(R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_1 C_2(1-K)) + 1} \quad (2.9)$$



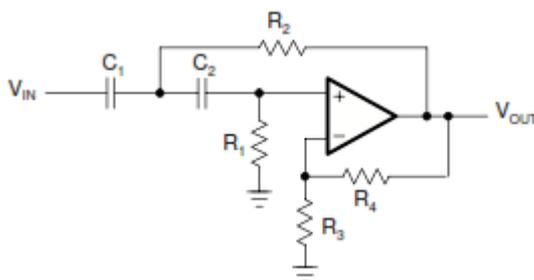
Gambar 2. 21 Low Pass Filter Sallen-Key orde 2

Sumber : Texas Instrument . Analysis of Sallen Key Architecture .2002 : 4

2.9.3 Filter High Pass Sallen Key Orde 2

Dengan mengganti komponen Z pada Gambar 2.22 dengan komponen R dan C seperti pada Gambar dan memasukkannya dalam persamaan 2.8, maka akan didapat rumus fungsi alih nya (Zumbahlehn, 2008) :

$$H(s) = \frac{V_0}{V_I} = \frac{K (s^2(R_1 R_2 C_1 C_2))}{s^2(R_1 R_2 C_1 C_2) + s(R_2 C_2 + R_2 C_1 + R_1 C_2(1-K)) + 1} \quad (2.10)$$



Gambar 2. 22 High Pass Filter Sallen-Key orde 2

Sumber : Texas Instrument . Analysis of Sallen Key Architecture .2002 : 9

2.9.4 Respon Butterworth

Respon filter bermacam-macam. Berbeda dengan Chebyshev yang memiliki karakteristik memiliki *ripple* di daerah *passband* nya, dan Bessel di mana memang memiliki *roll-off attenuation* yang lambat. Respon filter buterworth adalah memiliki respon yang *maximally flat* (datar) untuk daerah *passband*nya tanpa adanya *ripple*. Fungsi transfernya adalah (Wai-Kai, 1986) :

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{H_o}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (2.11)$$

$$|H(j\omega)|^2_{\omega=-js} = H(j\omega)H(-j\omega)|_{\omega=-js} = H(s)H(-s) = \frac{H_o}{1 + (-1)^n \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^{2n}}$$

Atau

$$H(y)H(-y) = \frac{H_o}{1 + (-1)^n y^{2n}}$$

Dengan $y = s/\omega_c$. Nilai dari akar persamaan ini meunjukkan kutub (*pole*) sebuah sistem

$$1 + (-1)^n y^{2n} = 0$$

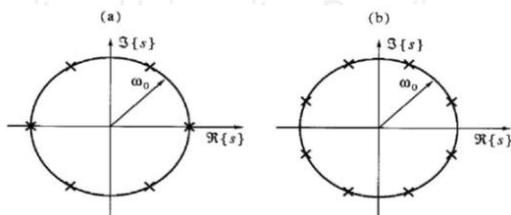
Dapat disederhanakan menjadi :

$$y^{2n} = (-1)^{n+1} = e^{j(n+1)\pi + j2k\pi}$$

Untuk k adalah semua integer termasuk nol. Walaupun ada banyak pilihan tak terbatas untuk k, tetapi hanya ada 2n akar yang berbeda yang mungkin (*possible*) yang didapat melalui:

$$s^k = \omega_c \exp \left[\frac{j(2k+n-1)\pi}{2n} \right] \quad k=1, 2, \dots, 2n$$

Letak *pole* (kutub di bidang s-plane untuk orde (n) 3 dan 4 seperti Gambar berikut. Dari Gambar 2.23 terlihat bahwa letak dari *pole* tersebar merata secara simetris terhadap sumbu *real* dan imajiner. Sejak kita hanya tertarik pada rangkaian yang stabil, $H(s)$ harus tanpa adanya *pole* di bagian kanan *s-plane*.



Gambar 2. 23 a) n orde 3 dan b) n orde 5

Sumber : Chen, Wai-Kai.1986 : 55

Untuk itu kita anggap semua *pole* yang di kiri sebagai bagian dari $H(s)$, dan $H(-s)$ di bagian kanan. Sehingga kita atur ulang persamaanya menjadi :

$$1 + (-1)^n y^{2n} = q(y)q(-y)$$

Di mana : $q(y) = a_0 + a_1 y + \dots + a_{n-1} y^{n-1} + a_n y^n = \sum_{m=0}^n a_m y^m$. Dengan $a_0 = a_n = 1$. Persamaan tersebut dikenal sebagai persamaan polinomial Hurwitz dengan n derajat yang dibentuk oleh bagian kiri *pole* dengan bagian negatif untuk bagian *real* (sehingga *pole* yang dihitung terletak di sebelah kiri saja), yang letaknya adalah :

$$y^k = \frac{s_k}{\omega_c} = \exp \left[\frac{j(2k+n-1)\pi}{2n} \right] \quad k=1, 2, \dots, n$$

Polinomial di persamaan disebut juga Butterworth polynomial, sehingga fungsi transfer nya:

$$H(s) = \frac{H_o}{q(y)} = \frac{H_o}{y^n + a_{n-1}y^{n-1} + \dots + a_1 y + a_0} = \frac{H_o}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (2.12)$$

Di mana koefisien dari a dapat dicari melalui

$$\frac{a_k}{a_{k-1}} = \frac{\cos \left[\frac{(k-1)\pi}{2n} \right]}{\sin \left(\frac{k\pi}{2n} \right)} \quad (2.13)$$

Tabel 2. 1 Daftar Koefisien Persamaan Butterworth

N	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
2	1.414214						
3	2.000000	2.000000					
4	2.613126	3.414214	2.613126				
5	3.236068	5.236068	5.236068	3.236068			
6	3.863703	7.464102	9.141620	7.464102	3.863703		
7	4.493959	10.097835	14.591794	14.591794	10.097835	4.493959	
8	5.125831	13.137071	21.846151	25.688356	21.846151	13.137071	5.125831

Sumber : Chen, Wai-Kai .1986:56

Tabel 2. 2 Daftar Letak Dari *Pole* Persamaan Butterworth

Order n	Real Part -α	Imaginary Part ±jβ	Order n	Real Part -α	Imaginary Part ±jβ
2	0.7071	0.7071	8	0.9808	0.1951
3	0.5000	0.8660		0.8315	0.5556
	1.0000			0.5556	0.8315
4	0.9239	0.3827		0.1951	0.9808
	0.3827	0.9239	9	0.9397	0.3420
5	0.8090	0.5878		0.7660	0.6428
	0.3090	0.9511		0.5000	0.8660
	1.0000			0.1737	0.9848
6	0.9659	0.2588		1.0000	
	0.7071	0.7071	10	0.9877	0.1564
	0.2588	0.9659		0.8910	0.4540
7	0.9010	0.4339		0.7071	0.7071
	0.6235	0.7818		0.4540	0.8910
	0.2225	0.9749		0.1564	0.9877
	1.0000				

Sumber : Chen, Wai-Kai .1986:56

Tabel 2. 3 Daftar Penyebut Persamaan Butterworth yang Sudah di Faktorisasi

N	$B_N(s)$
1	$(s + 1)$
2	$(s^2 + \sqrt{2}s + 1)$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + \sqrt{2 - \sqrt{2}}s + 1)(s^2 + \sqrt{2 + \sqrt{2}}s + 1)$
5	$(s + 1)\left(s^2 + \left(\frac{\sqrt{5}-1}{2}\right)s + 1\right)\left(s^2 + \left(\frac{\sqrt{5}+1}{2}\right)s + 1\right)$
6	$\left(s^2 + \left(\frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}}\right)s + 1\right)(s^2 + \sqrt{2}s + 1)\left(s^2 + \left(\frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{2}}\right)s + 1\right)$
7	$(s + 1)(s^2 + 0.4450s + 1)(s^2 + 1.2470s + 1)(s^2 + 1.8019s + 1)$
8	$(s^2 + 0.3902s + 1)(s^2 + 1.1111s + 1)(s^2 + 1.6629s + 1)(s^2 + 1.9616s + 1)$
9	$(s + 1)^2(s^2 + 0.3473s + 1)(s^2 + 1.5321s + 1)(s^2 + 1.8794s + 1)$
10	$(s^2 + 0.3219s + 1)(s^2 + 0.9080s + 1)(s^2 + 1.4142s + 1)(s^2 + 1.7820s + 1)(s^2 + 1.9754s + 1)$

Sumber : Chen, Wai-Kai .1986:56

Untuk kemudahan, sudah ada tabel 2.1 mengenai koefisien Butterworth dengan $a_n=a_0=1$, tabel 2.2 mengenai letak *pole* serta tabel 2.3 mengenai faktorisasi buterworth.

2.10 Mikrokontroler ATMEGA 328P

ATMega328 adalah mikrokontroler keluaran atmel yang mempunyai arsitektur RISC (*Reduce Instruction Set Computer*) arsitektur CISC (*Completed Instruction Set Computer*).

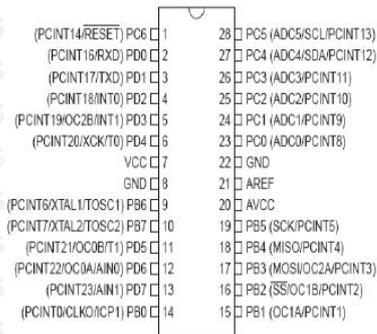
ATMega328 ini memiliki beberapa fitur antara lain:

- 1) Mempunyai 130 macam instruksi yang hampir semuanya dieksekusi dalam 1 siklus *clock*.
- 2) Memiliki 32 x 8-bit register serba guna.
- 3) Kecepatan mencapai 16 MIPS dengan clock 16 MHz.
- 4) Memiliki 6 pin input analog diantaranya *PWM (Pulse Width Modulation)* output dengan resolusi ADC 10 bit
- 5) *Flash memory* sebesar 32 KB dan pada arduino memiliki *bootloader* yang menggunakan 2 KB dari flash memori sebagai *bootloader*.
- 6) Memiliki *EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)* sebesar 1KB sebagai tempat penyimpanan data semi permanent karena *EEPROM* tetap dapat menyimpan data meskipun catu daya dimatikan.
- 7) Memiliki *SRAM (Static Random Access Memory)* sebesar 2KB.
- 8) Memiliki pin I/O digital sebanyak 14 pin 6 *Master/ Slave SPI Serial interface*.

Mikrokontroler ATmega 328 memiliki arsitektur Harvard, yaitu memisahkan memori untuk kode program dan memori untuk data sehingga dapat memaksimalkan kerja dan *parallelism*. Instruksi – instruksi dalam memori program dieksekusi dalam satu alur tunggal,

di mana pada saat satu instruksi dikerjakan instruksi berikutnya sudah diambil dari memori program. Konsep inilah yang memungkinkan instruksi – instruksi dapat dieksekusi dalam setiap satu siklus *clock*.

Tampilan pin-out ATmega 328 seperti pada Gambar 2.24. Selain register serba guna, terdapat register lain yang terpetakan dengan teknik *memory mapped I/O* selebar 64 byte. Beberapa register ini digunakan untuk fungsi khusus antara lain sebagai register control *Timer/Counter*, Interupsi, ADC, USART, SPI, EEPROM, dan fungsi I/O lainnya.



Gambar 2. 24 Pin-pin Atmega 328P

Sumber :Atmel. 20120 : 3

2.11 Arduino

Arduino adalah sebuah board mikrokontroller yang berbasis ATmega 328p. Arduino memiliki fitur dasar Atmega 328p dengan koneksi USB, jack power, kepala ICSP, dan tombol *reset*. Bentuk *board* Arduino terlihat pada Gambar 2.25. Arduino dapat dikoneksikan dengan komputer menggunakan kabel USB. Arduino ditulis memakai bahasa C++ yang sudah dimodifikasi dalam arduino IDE nya. Catu daya yang dipakai 5 V. Hanya butuh 100 μ s (0,0001 s) untuk membaca input analog (ADC), jadi maksimum nilai yang dapat dibaca adalah 10.000 kali dalam 1 sekon



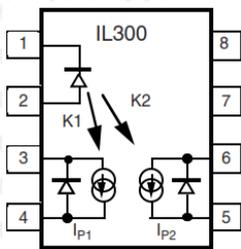
Gambar 2. 25 Board Arduino Uno berbasis ATmega 328P

Sumber : <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

2.12 Analog *Optocoupler*

Analog *optocoupler* adalah *optocoupler* yang berisi satu LED dan sepasang dioda dengan karakteristik optik yang sesuai. Analog *optocoupler* ini dapat digunakan sebagai rangkaian isolasi cahaya, sehingga rangkaian dibagian masukan tidak akan terhubung secara langsung dengan rangkaian di bagian keluaran. Analog *optocoupler* dapat memberikan keluaran tegangan yang linear dengan tegangan masukan dengan menambahkan op-amp disisi masukan dan keluaran.

Analog *optocoupler* yang digunakan adalah IC IL300. IC ini terdiri dari sebuah LED dan 2 buah photodiode yang identik. Untuk menggunakan IC IL300 menjadi analog *optocoupler* maka diperlukan 2 buah Op-amp tambahan disisi kanan dan kiri. Op-amp ini berfungsi untuk men-drive LED.



Gambar 2. 26 IC IL300

Sumber : Application note IL300

Rangkaian akan sesuai dengan gambar 2.27. Umpan balik pada photodiode 1 dihubungkan dengan R_1 dan terminal negatif op-amp. Maka arus pada photodiode I_{P1} adalah

$$I_{P1} = \frac{V_{IN}}{R_1} \quad (2.15)$$

Besar arus ini akan sebanding dengan feedback transfer gain (K_1) dikalikan dengan arus yang mengalir pada LED:

$$K_1 \times I_F = I_{P1} \quad (2.16)$$

Pada photodiode ke 2 dihubungkan dengan Op-amp kedua dan diberikan R_2 sebagai umpan balik negative op-amp. Besar arus pada photodiode 2 karena adanya cahaya dari LED:

$$I_{P2} = K_2 \times I_F \quad (2.17)$$

Nilai dari I_{P2} bergantung dari besar dari keluaran transfer gain (K_2). Maka Tegangan keluaran akan sama dengan I_{P2} dikalikan dengan R_2 .

$$V_{out} = I_{P2} \times R_2 \quad (2.18)$$

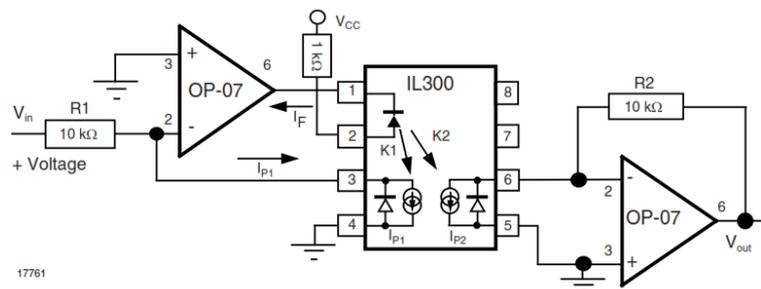
Maka,

$$\frac{V_{out}}{V_{IN}} = \frac{I_{P2} \times R_2}{K_1 \times I_{F} \times R_1} \quad (2.19)$$

Substitusi persamaan 2.17 dengan persamaan 2.19 menghasilkan

$$\frac{V_{out}}{V_{IN}} = \frac{K_2 \times R_2}{K_1 \times R_1} \quad (2.20)$$

Nilai dari K_2/K_1 adalah K_3 yang merupakan transfer gain dari IC IL300. Di mana tiap tipenya mempunyai nilai yang berbeda beda. Besar dari K_1 dan K_2 adalah sebesar 0.007 pada suhu 25°C , serta IC ini dapat menghasilkan tegangan yang linier jika menggunakan Op-amp seri OP-07.



Gambar 2. 27 Rangkaian Isolasi IL300 dengan tegangan unipolar

Sumber : Application note IL300

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Penentuan Spesifikasi Alat

Spesifikasi alat secara global ditetapkan terlebih dahulu sebagai acuan dalam perancangan selanjutnya. Spesifikasi alat yang direncanakan yaitu:

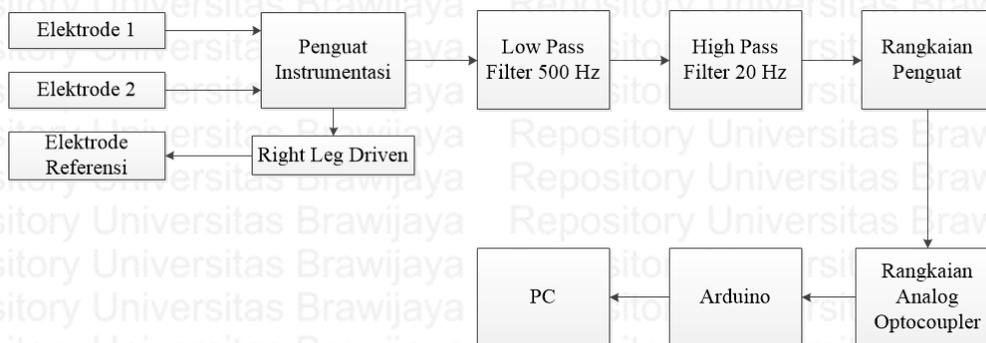
- 1) Gelombang otot yang disadap berkisar antara 20-500 Hz, dengan amplitudo tegangan $10m V_{p-p}$.
- 2) Memakai 3 elektrode Ag/AgCl.
- 3) Elektrode referensi dihubungkan dengan Driven Right Leg untuk mengurangi *common mode*.
- 4) Memakai ADC dengan 10 bit resolusi
- 5) Sistem menggunakan catu daya DC.
- 6) Matlab digunakan sebagai *software* pengolah data digital dari arduino menjadi tampilan grafis pada komputer.

3.2 Perancangan dan Pembuatan Alat

Perancangan dan pembuatan alat dalam skripsi ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu *hardware* dan *software*.

3.2.1 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Keras (*Hardware*)

Secara garis besar, blok diagram perancangan *hardware* sistem secara keseluruhan ditunjukkan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Blok diagram desain Sistem EMG

Penjelasan blok diagram :

- a. *Elektrode* dipakai untuk mengkonversi sinyal – sinyal listrik dalam tubuh (dibawa oleh ion-ion elektrolit tubuh) ke dalam bentuk beda potensial dalam penghantar elektrode.
- b. *Rangkaian Op-amp Instrumentasi* ; rangkaian ini digunakan untuk mengambil selisih tegangan antara elektrode 1 dan 2, serta memperkuatnya karena hasil sinyal sadapan elektrode rendah, berkisar $-5\text{ mV} - 5\text{ mV}$.
- c. *Right Leg Driven* ; rangkaian ini digunakan untuk memperlemah *common mode* dari sinyal – sinyal yang disadap, tegangan mode common ini akan di umpanbalikkan ke elektrode referensi, sehingga tegangan mode common di tubuh akan berkurang.
- d. *Low pass Filter 500 Hz*; rangkaian ini adalah rangkaian memakai komponen op-amp sehingga selain melemahkan sinyal pada frekuensi tinggi , juga dapat menguatkan sinyal-sinyal masukan.
- e. *High pass Filter 20 Hz*; rangkaian ini adalah rangkaian memakai komponen op-amp sehingga selain melemahkan sinyal pada frekuensi rendah, juga dapat menguatkan sinyal-sinyal masukan.
- f. *Rangkaian Penguat* ; rangkaian ini digunakan untuk menyesuaikan tegangan masukan sinyal analog supaya sesuai dengan tegangan minimum dan maksimum dari ADC, yaitu $0-5\text{ V}$.
- g. *Rangkaian Analog Optocoupler* : rangkaian ini digunakan untuk melindungi pengguna dari arus-arus tegangan tinggi ke dalam tubuh. Selain itu juga untuk memisahkan rangkaian EMG dengan rangkaian yang terhubung dengan PC.
- h. *Arduino* ; adalah sebuah board mikrokontroler yang mempunyai ADC internal dengan resolusi 10 bit. ADC (*analog – digital converter*) adalah pengubah sinyal analog menjadi sinyal digital, dan kemudian dapat di transferkan ke PC
- i. *PC*; digunakan untuk menampilkan sinyal-sinyal EMG dalam bentuk grafik dengan memakai software Matlab.

3.2.1.1 Desain Rangkaian Penguat Instrumentasi

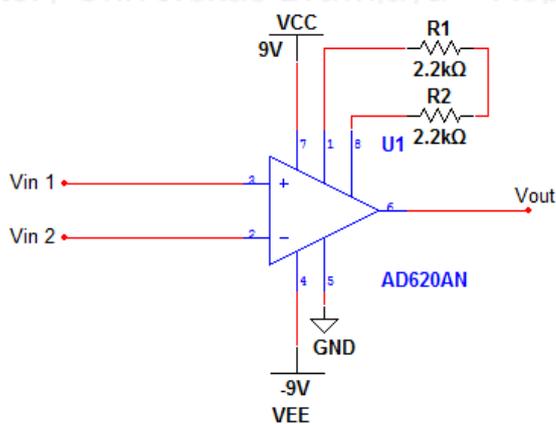
Sinyal yang disadap elektrode sangat kecil. Untuk menampilkan sinyal tersadap tersebut dibutuhkan penguatan yang besar. Intensitas gelombang otot berkisar 10 mVp-p dan sangat mudah terganggu sinyal *noise* sehingga diperlukan suatu penguat instrumentasi yang dapat menguatkan sinyal.

Komponen yang digunakan sebagai penguat instrumentasi adalah IC tipe AD620, yaitu IC dengan tiga buah op-amp dalam satu kemasan. Besar penguatannya sesuai datasheet AD620 ini, sudah ditentukan dengan Persamaan 3.1:

$$G = 1 + \frac{49,4K}{R_G} \quad (3.1)$$

Penentuan *gain* hanya menggunakan satu resistor saja, yaitu resistor R_G . *Gain* diinginkan besarnya 12,23. Memang tidak terlalu besar karena mempertimbangkan *offset* DC yang dihasilkan oleh elektrode. *Offset* DC dari op-amp AD620 tidak terlalu besar/sangat kecil berkisar 30 μ V sehingga dapat diabaikan. Nilai R_G :

$$R_G = \frac{49,4K}{G - 1} = \frac{49,4K}{12,23 - 1} = 4,4 K$$

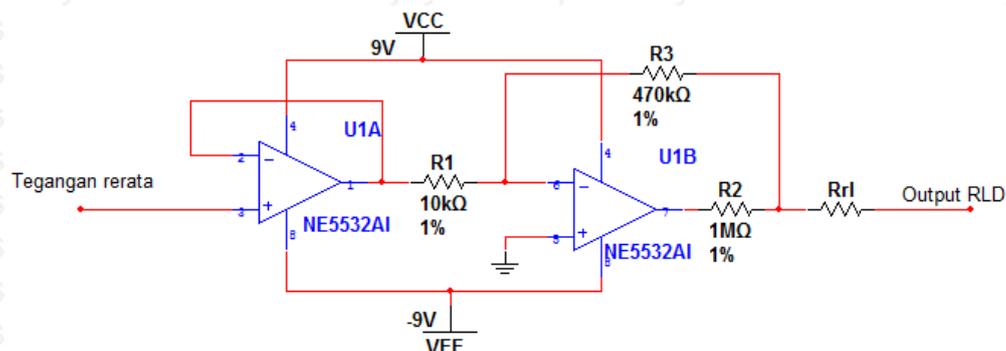


Gambar 3. 2 Rangkaian Penguat Instrumentasi AD620

3.2.1.2 Desain dan Perancangan Rangkaian Right Leg Driver (RLD)

Desain rangkaian ini sering dipakai dalam aplikasi EKG (Elektrokardiograf). Desain dan perancangan sesuai pada bahasan pada sub-bab 2.8 di Bab II akan ditambahkan rangkaian *voltage follower* yang berfungsi sebagai *buffer* rangkaian.

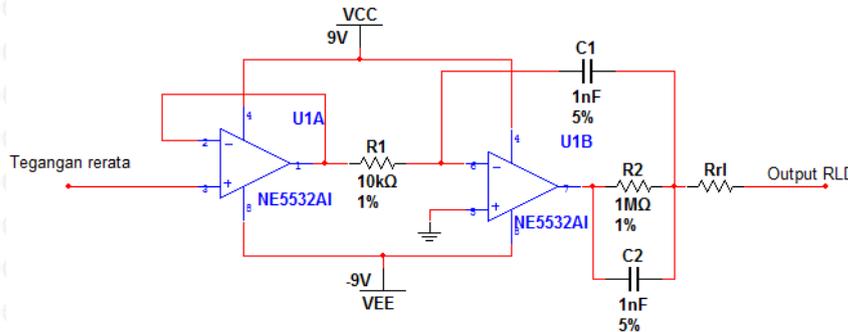
Tegangan rata-rata diambil dari dari titik tengah nilai resistor R_G yang bernilai sama. Nilai tegangan rerata ini adalah tegangan *mode common*. Rangkaian *buffer* digunakan agar tidak ada *loading effect* yang terjadi.



Gambar 3. 3 Desain RLD

Sebuah resistor dipasang seri dengan keluaran op-amp inverting sebagai pembatas arus untuk *safety* bila terjadi *short circuit*. Nilai R_O yang bisa dipakai sekitar $10\text{ K}\Omega$ hingga $10\text{ M}\Omega$ dan diambil nilai $1\text{ M}\Omega$.

Desain RLD baru pada Gambar 3.4 dengan menambahkan kapasitor C_1 1 nF pada *feedbacknya* untuk menghindari osilasi.



Gambar 3. 4 Desain RLD dengan tambahan C

3.2.1.3 Desain dan Perancangan Filter Sallen Key dengan Respons Butterworth Orde 4

Filter yang dirancang harus dapat meloloskan sinyal-sinyal EMG dari frekuensi 20 Hz sampai dengan frekuensi 500 Hz. Di atas frekuensi tersebut, sinyal – sinyal yang muncul pada masukan penguat EMG harus dapat diredam.

Filter yang digunakan adalah jeni *low pass filter* dan *high pass filter*. Desain yang digunakan memakai topologi sallen key karena penggunaan komponen eksternal yang sedikit. Respons yang dipilih untuk daerah *passband* adalah respons Butterworth karena respons ini tidak memiliki *ripple* dan mempertahankan kedataran *gain*, sehingga penguatan sinyal masukan EMG yang masuk ke filter mengalami penguatan *gain* yang seragam. Orde filter diusahakan memiliki *roll-off gain* yang besar, mendekati tanggapan ideal. Untuk orde ke-1, *roll-off gain*nya 20 dB/dekade. Untuk sistem yang membutuhkan tingkat presisi tinggi, *roll-off* 20 dB/dekade dirasa lamban, sehingga desain yang dipakai memakai orde ke-4, dengan *roll-off gain* 80 dB/dekade.

3.2.1.3.1 Desain dan Perancangan Low Pass Filter

Filter *low pass* 500 Hz dengan orde ke-4 disusun dengan meng *cascade* kan filter *low pass* sallen key orde ke-2 menjadi 2 *stage*. Sehingga untuk setiap *stage*, fungsi keluarannya akan sama dengan Persamaan 2.7.

$$H(s) = \frac{V_0}{V_I} = \frac{K}{s^2(R_1R_2C_1C_2) + s(R_1C_1 + R_2C_1 + R_1C_2(1 - K)) + 1}$$

Gain yang di inginkan adalah 1 ($K=1$), sehingga Persamaan 2.7 akan menjadi :

$$H(s) = \frac{V_0}{V_I} = \frac{1}{s^2(R_1R_2C_1C_2) + s(R_1C_1 + R_2C_1) + 1}$$

Dengan mengubah Persamaan fungsi transfer sallen key dalam bentuk yang lebih umum, yaitu

$$H(s) = \frac{V_0}{V_I} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + s\beta\omega_c + \omega_c^2} \quad (3.2)$$

Mengacu pada Persamaan 2.7, akan didapatkan

$$\omega_c^2 = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \quad (3.3)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.4)$$

dan

$$\beta = \frac{R_1C_1 + R_2C_1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.5)$$

Bila $R_1 = R$, $R_2 = mR$ dan $C_1 = C$, $C_2 = nC$, Persamaan 3.5 menjadi :

$$\beta = \frac{RC + mRC}{\sqrt{mR^2nC^2}} = \frac{1+m}{\sqrt{mn}} \quad (3.6)$$

Persamaan 3.2 akan serupa dengan fungsi transfer Butterworth yaitu :

$$H(s) = \frac{H_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}$$

Untuk polinomial Butterworth orde ke-4 yang dilihat pada tabel 2.3

$$H(s) = \frac{1}{(s^2 + \sqrt{2} - \sqrt{2}s + 1)(s^2 + \sqrt{2} + \sqrt{2}s + 1)}$$

Akan terdapat 2 stage filter untuk orde 4 low pass filter dengan respons Butterworth. Dengan nilai β yang berbeda.

$$\beta_1 = \sqrt{2 + \sqrt{2}} = 1,8478$$

$$\beta_2 = \sqrt{2 - \sqrt{2}} = 0,7654$$

Sehingga implementasi filter didapatkan dengan mengkaskade topologi filter sallen key orde 2 dengan 2 stage, di mana tiap stage mempunyai nilai β yang berbeda.

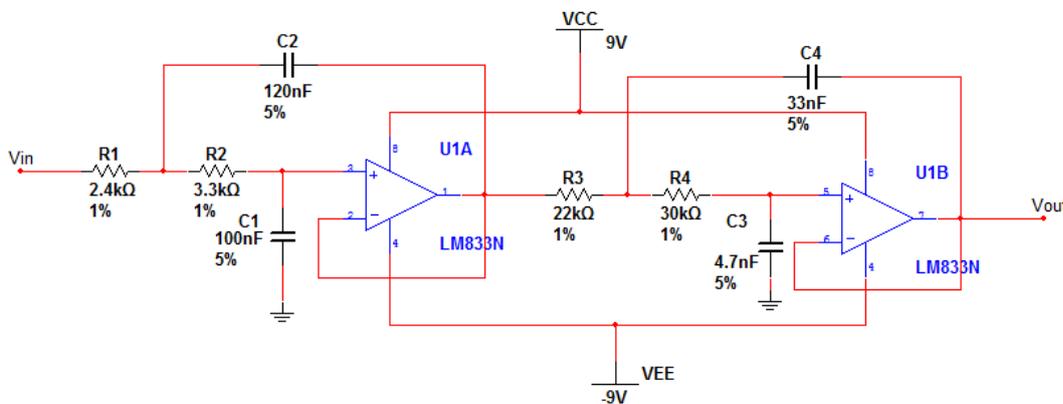
Untuk stage pertama :

1. Tentukan nilai m; $m=1,4$.
2. Dengan nilai $\beta = 1,8478$ nilai dari mn dengan Persamaan 3.6; $\beta = \frac{1+m}{\sqrt{mn}}$ dapat diketahui yaitu 1,69.
3. Nilai $n = \frac{mn}{m} = 1,69/1,4 = 1,2$
4. Pilih nilai C yang ada di pasaran. $C= 100$ nF.

- Dari hasil yang didapat sebelumnya dan dibulatkan dengan memilih nilai komponen yang tersedia di pasaran, $C_1=100 \text{ nF}$; $C_2=n \times C_1= 120 \text{ nF}$.
- Nilai R didapatkan dari rumus 3.4 ; $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$ dengan menentukan $f_c = 500 \text{ Hz}$ akan didapatkan $R_1= R = 2455,8 \approx 2,4 \text{ K}\Omega$. $R_2=m \times R_1=3.3 \text{ K}\Omega$

Untuk *stage* kedua :

- Tentukan nilai m; $m=1.4$.
- Dengan nilai $\beta = 0,7654$ nilai dari mn dengan Persamaan 3.6 $\beta = \frac{1+m}{\sqrt{mn}}$ dapat diketahui yaitu 9.8.
- Nilai $n = \frac{mn}{m} = 9.8/1.4 = 7$.
- Pilih nilai C yang ada di pasaran. $C= 4,7 \text{ nF}$.
- Dari hasil yang didapat sebelumnya dan dibulatkan dengan memilih nilai komponen yang tersedia di pasaran, $C_1=4,7 \text{ nF}$; $C_2=n \times C_1= 32,9 \text{ nF} \approx 33\text{nF}$.
- Nilai R didapatkan dari rumus 3.4; $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$ dengan menentukan $f_c = 500 \text{ Hz}$ akan didapatkan $R_1=R=21600,83 \approx 22 \text{ K}\Omega$; $R_2= m \times R_1=30,8 \text{ K}\Omega \approx 30\text{K}\Omega$.



Gambar 3. 5 Desain Low Pass Filter orde 4

3.2.1.3.2 Desain dan Perancangan High pass Filter

Filter *high pass* 20Hz dengan orde ke-4 disusun dengan meng *cascade* kan filter *high pass* *sallen key* orde ke-2 menjadi 2 *stage*. Sehingga untuk setiap *stage*, fungsi keluarannya akan sama dengan Persamaan 2.8.

$$H(s) = \frac{V_0}{V_1} = \frac{K (s^2(R_1R_2C_1C_2))}{s^2(R_1R_2C_1C_2) + s(R_2C_2 + R_2C_1 + R_1C_2(1 - K)) + 1}$$

Gain yang di inginkan adalah 1 ($K=1$), sehingga Persamaan 2.8 akan menjadi :

$$H(s) = \frac{V_0}{V_I} = \frac{(s^2(R_1R_2C_1C_2))}{s^2(R_1R_2C_1C_2) + s(R_2C_2 + R_2C_1) + 1}$$

Dengan mengubah Persamaan fungsi transfer sallen key dalam bentuk yang lebih umum, yaitu

$$H(s) = \frac{V_0}{V_I} = \frac{s^2}{s^2 + s\beta\omega_c + \omega_c^2} \quad (3.7)$$

Mengacu pada Persamaan 2.8, akan didapatkan

$$\omega_c^2 = \frac{1}{R_1R_2C_1C_2} \quad (3.8)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.9)$$

dan

$$\beta = \frac{R_2C_2 + R_2C_1}{\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (3.10)$$

Bila $R_1 = mR$, $R_2 = R$ dan $C_1 = C_2 = C$, Persamaan 3.10 menjadi :

$$\beta = \frac{RC + RC}{\sqrt{mR^2C^2}} = \frac{2}{\sqrt{m}} \quad (3.11)$$

Persamaan 3.7 akan serupa dengan fungsi transfer Butterworth yaitu :

$$H(s) = \frac{H_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}$$

Untuk polinomial Butterworth orde ke-4 yang dilihat pada tabel 2.3

$$H(s) = \frac{1}{(s^2 + \sqrt{2} - \sqrt{2}s + 1)(s^2 + \sqrt{2} + \sqrt{2}s + 1)}$$

Akan terdapat 2 *stage* filter untuk orde 4 *high pass* filter dengan respons Butterworth.

Dengan nilai β yang berbeda.

$$\beta_1 = \sqrt{2 + \sqrt{2}} = 1,8478$$

$$\beta_2 = \sqrt{2 - \sqrt{2}} = 0,7654$$

Sehingga implementasi filter didapatkan dengan mengkaskade topologi filter sallen key orde 2 dengan 2 *stage*, di mana tiap *stage* mempunyai nilai β yang berbeda.

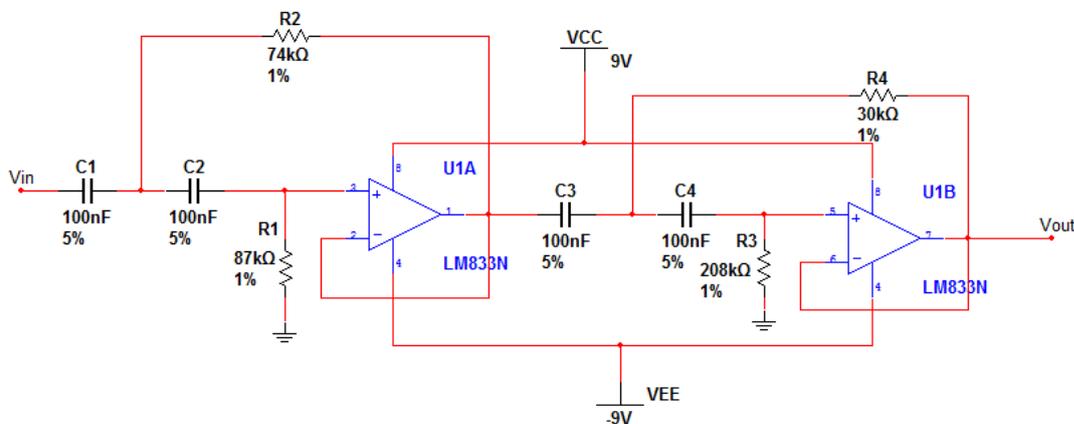
Untuk *stage* pertama :

1. Tentukan nilai C yang ada dipasaran; $C=100\text{nF}$.
2. Maka $C_1=C_2=C=100\text{nF}$.
3. Dengan nilai $\beta = 1,8478$ nilai dari m dengan Persamaan 3.11; $\beta = \frac{2}{\sqrt{m}}$ dapat diketahui yaitu $m = 1,17$.

4. Nilai R didapatkan dari rumus 3.9 ; $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$ dengan menentukan $f_c = 20$ Hz akan didapatkan $R_2 = R = 73569,4 \approx 74$ K Ω . $R_1 = m \times R_2 = 86,58$ K $\Omega \approx 87$ K Ω

Untuk *stage* kedua :

1. Tentukan nilai C yang ada dipasaran; $C=100$ nF.
2. Maka $C_1=C_2=C= 100$ nF.
3. Dengan nilai $\beta = 0,7654$ nilai dari m dengan Persamaan 3.11; $\beta = \frac{2}{\sqrt{m}}$ dapat diketahui yaitu $m = 6,83$.
4. Nilai R didapatkan dari rumus 3.9 ; $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$ dengan menentukan $f_c = 20$ Hz akan didapatkan $R_2 = R = 30454,3 \approx 30$ K Ω . $R_1 = m \times R_2 = 208$ K Ω



Gambar 3. 6 Desain High Pass Filter orde 4

3.2.1.4 Desain dan Perancangan Rangkaian Penguat

Sistem instrumentasi EMG ini dirancang sedemikian rupa sehingga keluaran dari rangkaian ini bersesuaian dengan masukan minimum dan maximum dari ADC eksternal board Arduino, yaitu 0-5 volt.

Jumlah penguatan pada blok diagram sebelumnya adalah :

$$Gain = 12,23$$

Dengan sinyal masukan antara -5 mV s/d 5 mV. Dan dengan *gain* sebelumnya, akan didapatkan tegangan sebesar:

$$\begin{aligned} V_{in_min} &: - \\ 5\text{mV} \times 12,23 &= -0,0615 \text{ V} \\ V_{in_max} &: 5\text{mV} \\ V \times 12,23 &= 0,0615 \text{ V} \end{aligned}$$

Sedangkan tegangan masukan untuk ADC berkisar antara 0-5 V.

$$v_{in_minADC} = mv_{in_min} + V_A$$

$$v_{in_maxADC} = mv_{in_max} + V_A$$

Dengan data yang tersedia, maka:

$$0 = -0,0615 m + V_A$$

$$5 = 0,0615 m + V_A$$

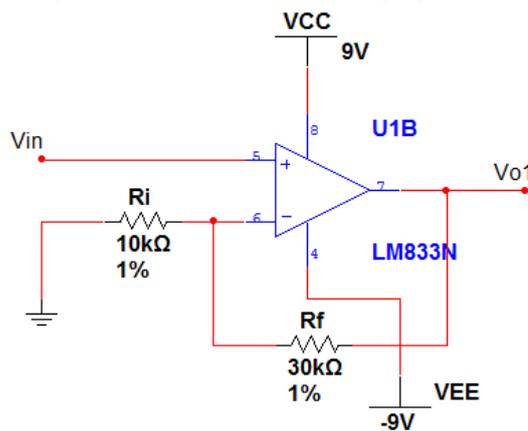
Kedua Persamaan diselesaikan dan akan didapatkan $m = 40,8$ dibulatkan menjadi $m = 40$; agar nilai minimum tidak bernilai negative dan $V_A = 2,5$ V. Persamaan fungsi alihnya akan menjadi :

$$v_{in_ADC} = 40v_{in_min} + 2,5$$

$$v_{in_ADC} = 10(4v_{in_min} - (-0,25)) \quad (3.13)$$

$$v_{in_ADC} = 10(V_{o1} - (-0,25)) \quad (3.14)$$

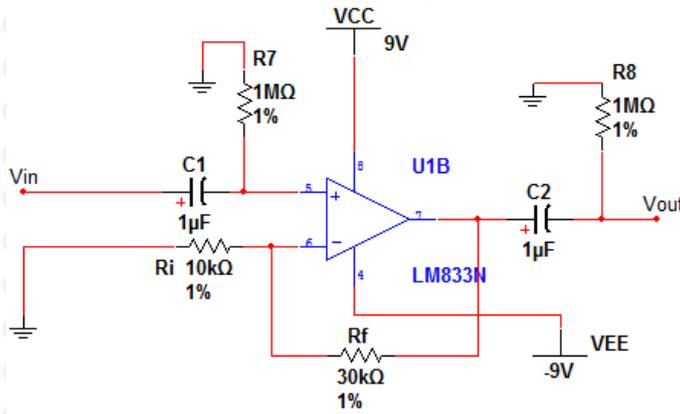
Sesuai persamaan 3.13 maka dilakukan 2 tahap penguatan, sinyal masukan di kuatkan sebesar 4 kali terlebih dahulu dengan menggunakan rangkaian penguat *non inverting* dengan mengatur $R_f = 30k\Omega$ dan $R_i = 10k\Omega$ menjadi V_{o1} .



Gambar 3. 7 Rangkaian Penguat *non-inverting*

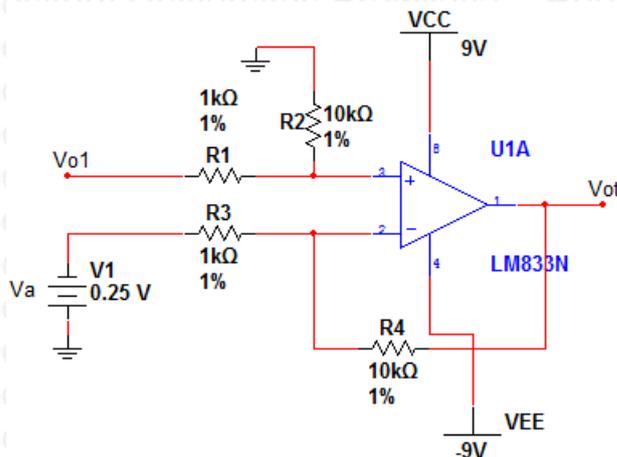
Untuk menghilangkan DC offset maka ditambahkan rangkaian *high pass filter* RC pada masukan dan keluaran.

- Frekuensi cut off yang diinginkan adalah 0.15Hz.
- Nilai kapasitor ditentukan lebih dahulu, dengan memakai komponen yang tersedia di pasaran yaitu 1uF.
- Menggunakan persamaan $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ akan di dapatkan nilai R_1 sebesar $1M\Omega$, sehingga rangkaian menjadi seperti Gambar 3.8



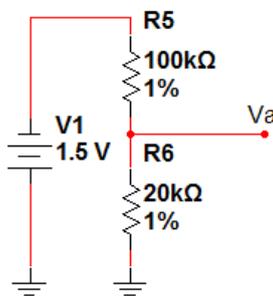
Gambar 3. 8 Rangkaian Penguat Non inverting dengan filter RC

Penguatan tahap kedua berdasarkan persamaan 3.14, sesuai untuk penguat differensial dengan $gain = 10$ dan tegangan $V_o = -0,25$ volt. $Gain$ didapat dengan mengatur perbandingan R_1 dan R_2 , di mana $R_1=R_3=1$ k Ω ; $R_2=R_4=10$ k Ω . Gambar perancangan penguat akhir dapat dilihat pada Gambar 3.9.



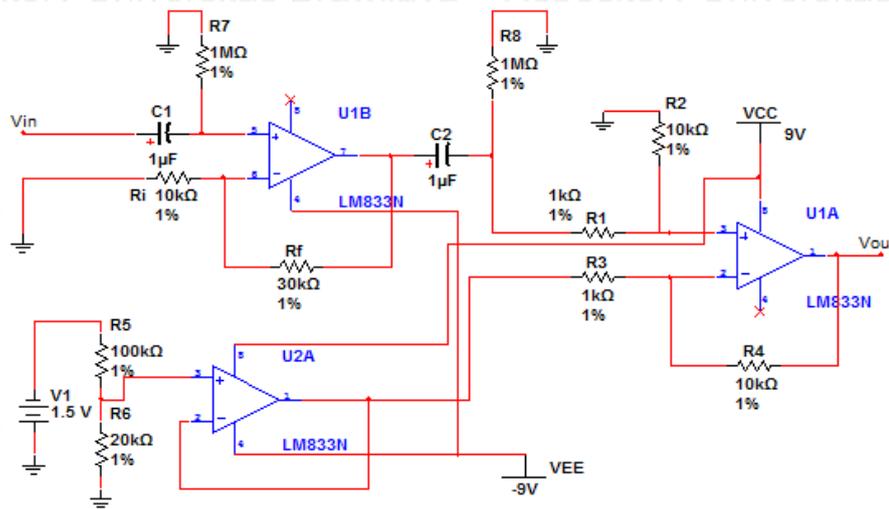
Gambar 3. 9 Rangkaian Penguat Akhir

$Offset$ sebesar 0,25V didapat dari rangkaian pembagi tegangan sebagai berikut:



Gambar 3. 10 Rangkaian Pembagi Tegangan

Untuk menghindari *loading effect* dari pembagi tegangan sebelum masuk ke penguat differensial, akan ditambahkan sebuah *voltage follower*, sehingga rangkaian akhir dari RPS seperti pada Gambar 3.11:



Gambar 3. 11 Desain Rangkaian Pengkondisi Sinyal

Total *gain* untuk semua tahap adalah :

$$\text{Total Gain} = 12,23 \times 40 = 489,2$$

3.2.1.5 Desain Rangkaian Analog Optocoupler

Desain dan perancangan rangkaian analog optocoupler ini sesuai pada bahasan pada sub-bab 2.12 di Bab II. Rangkaian yang digunakan adalah topologi *photovoltaic*. Dengan spesifikasi:

1. Tegangan masukkan sebesar 0-6 volt
2. Vcc sebesar 9V
3. Arus keluaran dari OP-07 adalah 15mA sebagai I_F
4. K_3 dari IL 300 adalah 0.73
5. Gain yang diinginkan adalah 1
6. Nilai dari K_1 adalah 0.007

Maka dengan persamaan 2.16 akan didapatkan nilai dari I_{P1} yaitu sebesar

$$I_{P1} = 0.007 \times 15\text{mA}$$

$$I_{P1} = 105\mu\text{A}$$

Dengan diketahuinya I_{P1} maka dapat ditentukan dari nilai R_1 dari persamaan 2.15, sebesar

$$R_1 = \frac{6}{105\mu\text{A}}$$

$$R_1 = 57142\Omega \approx 57\text{k}\Omega$$

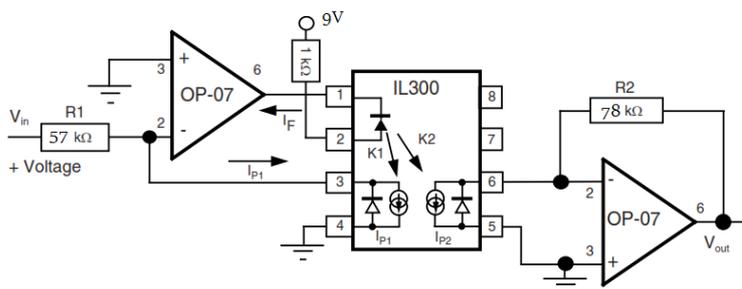
Maka nilai R_2 dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.20, dengan gain yang diinginkan adalah 1 agar tegangan keluaran linier dengan tegangan masukan serta K_2/K_1 adalah sebesar 0.73.

$$\frac{V_{out}}{V_{IN}} = \frac{K_2 \times R_2}{K_1 \times 57k\Omega}$$

$$R_2 = \frac{57k\Omega \times 1}{0.73}$$

$$R_2 = 78082\Omega \approx 78k\Omega$$

Sehingga rangkaian akhir dari analog optocoupler seperti gambar 3.12, R $1k\Omega$ digunakan untuk membatasi arus dari Vcc yang masuk ke LED.



Gambar 3. 12 Rangkaian Analog Optocoupler

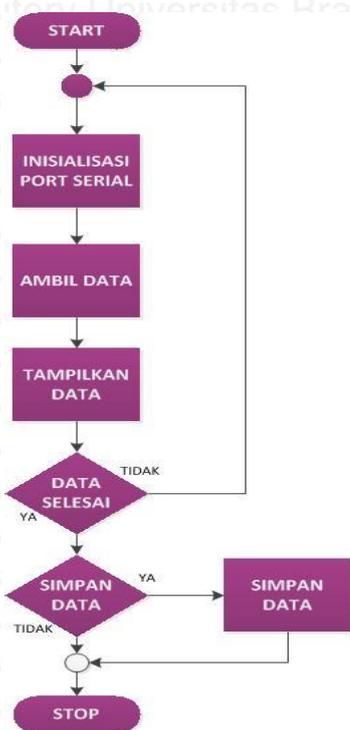
3.2.2 Perancangan dan Pembuatan Perangkat Lunak (Software)

Perancangan perangkat lunak ini bertujuan untuk mengolah data. Perancangan perangkat lunak ini terdiri dari perancangan perangkat lunak untuk arduino dan perancangan perangkat lunak untuk PC. Arduino dengan ATmega 328p nya digunakan sebagai DAQ (*Data acquisition*), menampung data analog hasil pengukuran, kemudian melakukan proses sampling ADC. Data digital dari ADC dikirim ke komputer melalui *interface* USB. Data ditampilkan dalam bentuk grafik memakai *software* Matlab.

Untuk dapat menghubungkan board arduino dengan matlab maka diperlukan untuk menginstall arduino package yang bisa didapatkan pada forum mathworks. Arduino package harus sudah terpasang pada matlab, dan pada arduino di upload file yang sudah terdapat pada arduino package dengan nama *adios.pde*, dengan adanya program *adios.pde* pada board arduino maka matlab dapat terhubung dengan board arduino.

Tegangan hasil rangkaian analog dihubungkan dengan pin analog arduino. Maka pin analog pada arduino diperiksa apakah ada data yang muncul atau tidak. Bila terdapat data, maka nilai dari analog akan diubah menjadi besaran diskrit. Bila tidak terdapat data, maka arduino akan menunggu sampai ada data untuk diproses dan diperiksa. Nilai yang didapat

akan dikonversi menjadi nilai yang sesuai dengan keluaran desimal aslinya. Setelah itu akan dikirimkan ke PC melalui *serial port*. Sistem akan bekerja bila ada catu daya.



Gambar 3. 13 Diagram alir Software untuk: Matlab

3.3 Pengujian Alat

Untuk menganalisis kinerja alat apakah sesuai dengan yang direncanakan maka dilakukan pengujian sistem pada masing – masing blok dan secara keseluruhan.

3.3.1 Perangkat Keras

Untuk pengujian perangkat keras, pengujian dilakukan pada beberapa bagian sesuai blok diagram alat yang ditunjukkan dalam Gambar 3.1. Pengujian yang dilakukan meliputi:

1) Op-amp Instrumentasi

Pengujian Op-amp Instrumentasi untuk menganalisis apakah penguatan sinyal keluaran sesuai dengan yang diharapkan atau tidak, serta untuk mengetahui besar CMRR dari op-amp instrumentasi ini. *Function generator* digunakan sebagai sinyal masukan dan sinyal keluaran diamati menggunakan osilospok.

2) Filter

Pengujian *Filter* dibutuhkan untuk melihat apakah frekuensi sinyal yang diinginkan sudah sesuai atau tidak, sehingga noise dapat diredam. *Function generator* digunakan sebagai sinyal masukan dengan frekuensi sinyal yang beragam. Sinyal keluaran

diamati menggunakan osiloskop untuk membandingkan respons gain filter terhadap frekuensi.

3) Rangkaian Penguat.

Pengujian dilakukan dengan mengamati sinyal keluaran terhadap sinyal masukan dan untuk mengetahui apakah sinyal keluaran mempunyai amplitudo yang sesuai dengan rentang masukan dari.

4) Rangkaian *Analog Optocoupler*

Pengujian dilakukan dengan mengamati sinyal keluaran terhadap sinyal masukan dan menganalisis apakah sinyal keluaran sesuai dengan masukan dari rangkaian pengkondisi penguat.

5) Arduino

Arduino diuji apakah sudah secara benar dapat menerima data dan dapat mengirimkan secara serial ke komputer.

3.3.2 Perangkat Lunak

Untuk pengujian perangkat lunak, pengujian dilakukan dengan cara mensimulasikan perangkat lunak pada sistem untuk menganalisis respons yang dihasilkan. Pengujian perangkat lunak bertujuan untuk menganalisis apakah perangkat lunak tersebut dapat mengolah data serta mengontrol sistem sesuai dengan perancangan yang telah dibuat.

3.3.3 Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem dilakukan setelah perangkat keras telah beroperasi seperti yang diharapkan serta perangkat lunak yang telah dibuat sesuai yang diharapkan. Perangkat keras dan perangkat lunak diujikan bersama-sama menjadi satu sistem. Sistem dikatakan berhasil jika perangkat keras dan perangkat lunak yang ada telah tersinergi dan bekerja sebagai sebuah sistem yang sesuai dengan spesifikasi rancangan.



BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

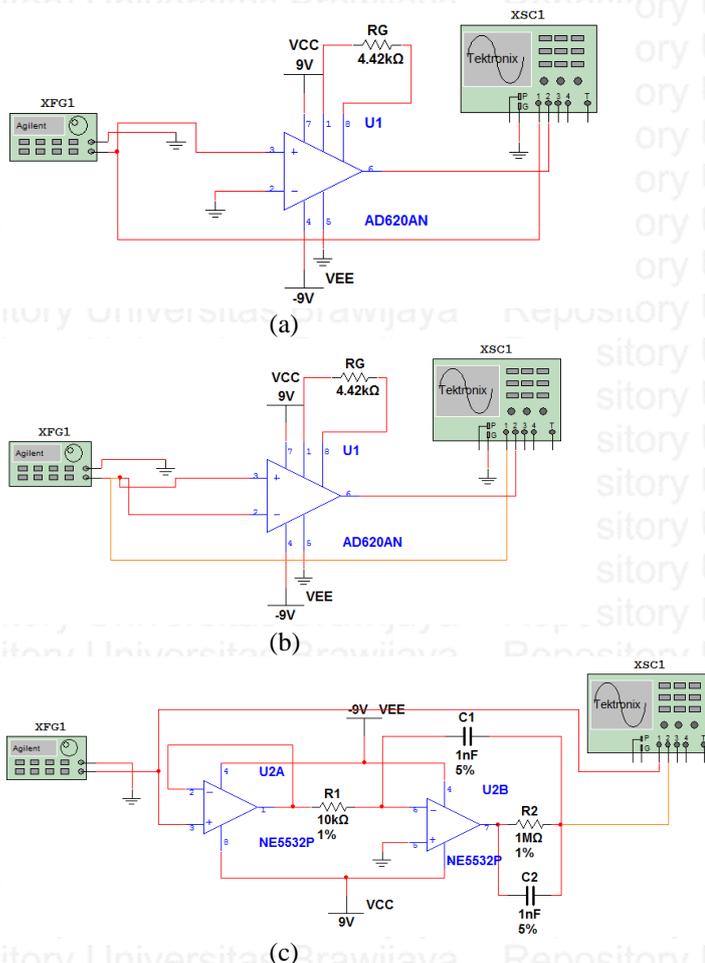
4.1 Hasil dan Analisis Pengujian Sub-Sistem

4.1.1 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian Penguat Instrumentasi dan RLD

Tujuan pengujian rangkaian penguat instrumentasi adalah untuk mengetahui besar penguatan dan CMRR dari sistem. Pengujian RLD ditujukan untuk mengetahui bentuk respon sinyal keluaran. Alat yang digunakan adalah *function generator* yang berfungsi untuk memberikan tegangan masukan sinusoida dan osiloskop untuk mengamati sinyal keluaran rangkaian yang diuji.

Prosedur pengujian yang dilakukan :

- Alat dirangkai seperti dalam Gambar 4.1 a ,b dan c
- Memberikan tegangan masukan sinyal sinusoida dari *function generator*
- Mengamati sinyal keluaran dan mencatat hasilnya untuk tiap rangkaian.



Gambar 4. 1 Pengujian a) Mode Differensial b) Mode Common c) RLD

Pada pengujian didapatkan data seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.1, 4.2 dan Tabel 4.3.

Tabel 4. 1 Pengujian Gain AD620

$V_{in}(V_{p-p}(mV))$	$V_{out}(V_{p-p}(V))$	<i>Gain</i>
100	1,22	12,2
200	2,4	12
300	3,76	12,53
400	4,88	12,2
500	6,12	12,24
600	7,28	12,13
700	8,4	12
800	9,92	12,4
900	11	12,22
1000	12,2	12,2
Gain Rata-Rata		12,21

Tabel 4. 2 Pengujian Gain Common Mode AD620

$V_{in}(V_{p-p}(mV))$	$V_{out}(V_{p-p}(mV))$	<i>Gain</i>
100	0,01	0,0001
200	0,014	0,00007
300	0,018	0,00006
400	0,024	0,00006
500	0,027	0,000054
600	0,033	0,000055
700	0,037	0,000053
800	0,041	0,00005125
900	0,045	0,00005
1000	0,05	0,00005
Gain Rata-rata		0,00006031

Tabel 4. 3 Perhitungan Nilai CMRR AD620

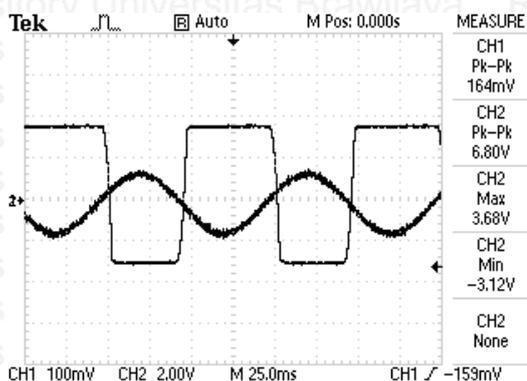
$V_{in}(V_{p-p}(V))$	<i>Gain Differential Mode</i>	<i>Gain Common Mode</i>	CMRR(dB)
100	12,2	0,0001	101,73
200	12	0,00007	104,68
300	12,53	0,00006	106,4
400	12,2	0,00006	106,16
500	12,24	0,000054	107,11
600	12,13	0,000055	106,87
700	12	0,000053	107,12
800	12,4	0,00005125	107,67
900	12,22	0,00005	107,76
1000	12,2	0,00005	107,75
CMRR Rata-rata			106,33

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *gain* rata-rata sebesar 12,21 kali untuk penguat instrumentasi AD620. Sedangkan *gain* yang dirancang adalah sebesar 12,23 kali. Berarti terdapat penyimpangan sebesar :

$$\text{Error Gain AD620} = \frac{12,23 - 12,21}{12,23} \times 100\% = 0,163\%$$
 Error terjadi karena adanya toleransi dari resistor eksternal yang dipakai.

Hasil perhitungan Tabel 4.3 menunjukkan bahwa rata-rata CMRR yang didapatkan adalah 106,33 dB. Nilai ini dirasa sudah sangat bagus karena memberikan nilai CMRR yang sangat cukup tinggi, walaupun nilai CMRR di *datasheet* memiliki nilai mencapai 110 dB pada penguatan sebesar 10x.

Gambar 4.2 menunjukkan hasil pengujian RLD. Dengan *channel 1* diwakili oleh sinyal masukan berupa sinyal sinusoida dan *channel 2* mewakili sinyal keluaran. Respon sinyal keluaran sesuai dengan yang dirancang, namun dalam praktek terdapat potongan saturasi.



Gambar 4. 2 Hasil Pengujian RLD

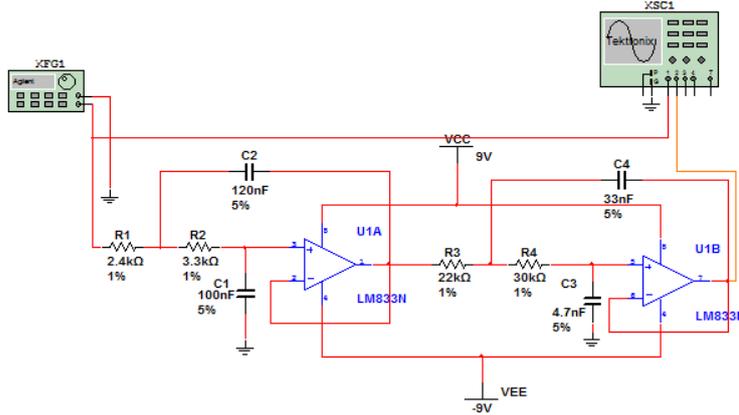
4.1.2 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian Filter

4.2.2.1 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian *Low pass* Filter

Tujuan pengujian rangkaian filter *low pass* untuk mengetahui besar penguatan (*gain*) dan letak titik frekuensi *cut-off* serta respon dari sinyal pada daerah passbandnya. Letak frekuensi *cut-off* ditentukan berdasarkan pada saat penurunan penguatan (redaman) filter sebesar -3dB. Alat yang digunakan adalah *function generator* yang berfungsi untuk memberikan tegangan masukan sinusoida dan osiloskop untuk mengamati sinyal keluaran rangkaian yang diuji.

Prosedur pengujian yang dilakukan adalah:

- Alat dirangkai seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.3
- Memberikan tegangan masukan sinyal sinusoida dari *function generator*
- Mengamati sinyal keluaran dan mencatat hasilnya.



Gambar 4. 3 Pengujian Rangkaian Low Pass Filter

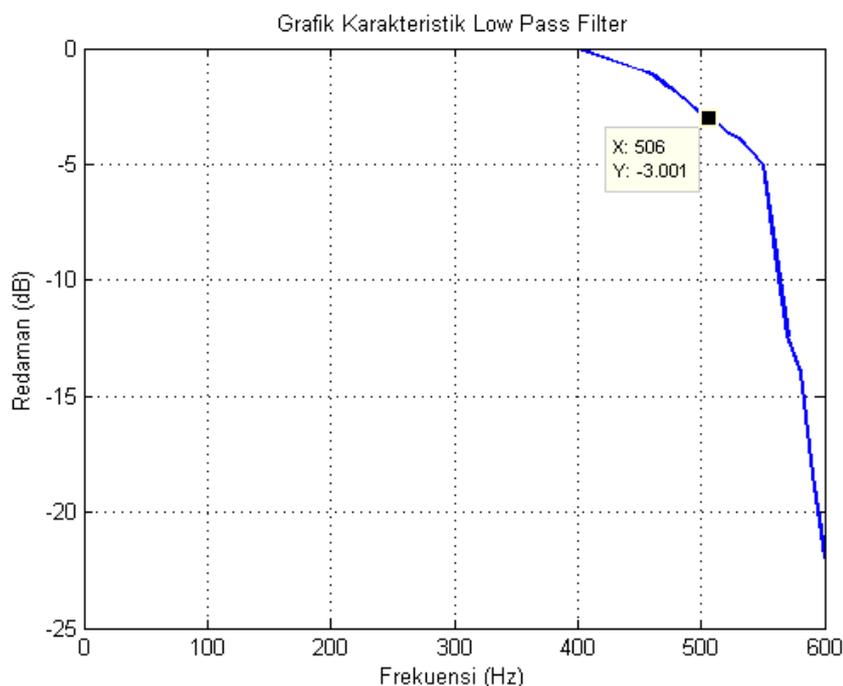
Pada pengujian telah didapatkan data-data seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Tabel Respons Frekuensi Rangkaian Low Pass Filter

Frekuensi(Hz)	$V_{in}(V_{p-p}(V))$	$V_{out}(V_{p-p}(mV))$	Gain (dB)
50	1	1000	0
100	1	1000	0
150	1	1000	0
200	1	1000	0
250	1	1000	0
300	1	1000	0
350	1	1000	0
400	1	1000	0
450	1	900	-0,915149811
460	1	880	-1,110346557
470	1	840	-1,514414279
480	1	800	-1,93820026
490	1	760	-2,383728154
500	1	720	-2,853350071
510	1	700	-3,0980392
520	1	660	-3,609121289
530	1	640	-3,87640052
540	1	600	-4,436974992
550	1	560	-5,03623946
560	1	360	-8,873949985
570	1	240	-12,39577517
580	1	200	-13,97940009
590	1	120	-18,41637508
600	1	80	-21,93820026

Dari Tabel 4.4 didapatkan grafik tanggapan frekuensi rangkaian Low Pass Filter yang ditunjukkan dalam Gambar 4.4. Untuk menentukan frekuensi *cut-off* filter ini, digunakan

Gambar 4.4 dan mencari frekuensi ketika redaman berada pada -3dB, dan diketahui bahwa frekuensi *cut-off* filter ini berada di frekuensi 506 Hz.



Gambar 4. 4 Grafik Karakteristik Low Pass Filter

Perancangan *cut-off* pada Bab III adalah 500 Hz, sehingga terjadi kesalahan sebesar :

$$\text{Error LPF} = \frac{500-506}{500} \times 100\% = 1,2\%.$$

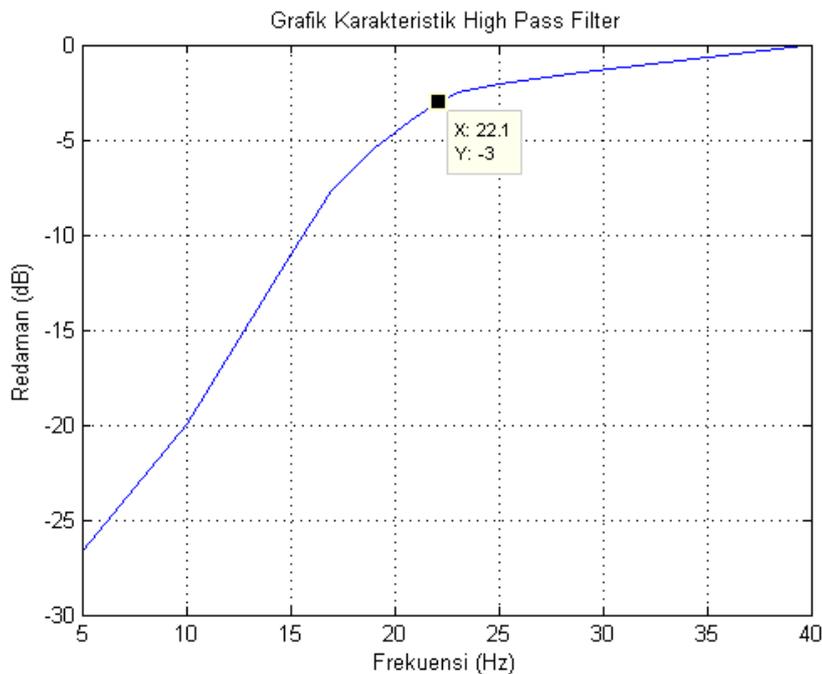
Error diakibatkan oleh toleransi komponen yang digunakan pada komponen kapasitor.

4.2.2.2 Pengujian Rangkaian High pass Filter

Tujuan pengujian rangkaian filter *high pass* untuk mengetahui besar penguatan (*gain*) dan letak titik frekuensi *cut-off* serta respon dari sinyal pada daerah passbandnya. Letak frekuensi *cut-off* ditentukan berdasarkan pada saat penurunan penguatan (redaman) filter sebesar -3dB. Alat bantu yang digunakan adalah *function generator* yang berfungsi untuk memberikan tegangan masukan sinusoida dan osiloskop untuk mengamati sinyal keluaran rangkaian yang diuji.

Prosedur pengujian yang dilakukan adalah:

- Alat dirangkai seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.5
- Memberikan tegangan masukan sinyal sinusoida dari *function generator*
- Mengamati sinyal keluaran dan mencatat hasilnya.



Gambar 4. 6 Grafik Karakteristik *High Pass Filter*

Perancangan *cut-off* pada Bab III adalah 20 Hz, sehingga terjadi kesalahan sebesar :

$$\text{Error HPF} = \frac{20-22,1}{20} \times 100\% = 10,5\%.$$

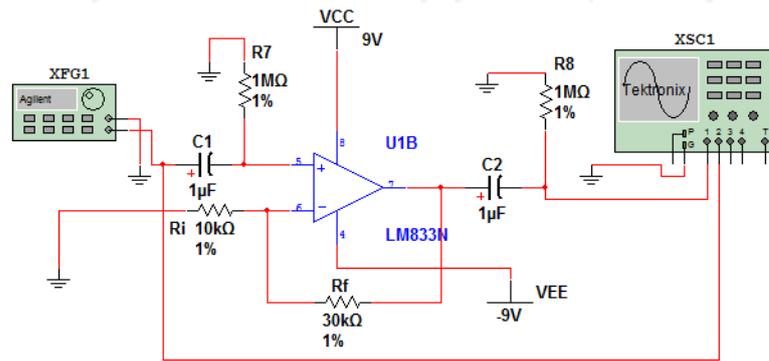
Error yang cukup besar ini diakibatkan oleh toleransi komponen yang digunakan, terutama pada nilai kapasitor yang terpaut jauh dari perancangan ketika dilakukan pengujian. Namun dengan adanya *error* ini tidak berpengaruh besar dikarenakan terdapat noise dari elektrode pada frekuensi 20 Hz, sehingga noise tersebut dapat diredam

4.1.3 Hasil dan Analisis Pengujian Rangkaian Penguat Tahap Akhir

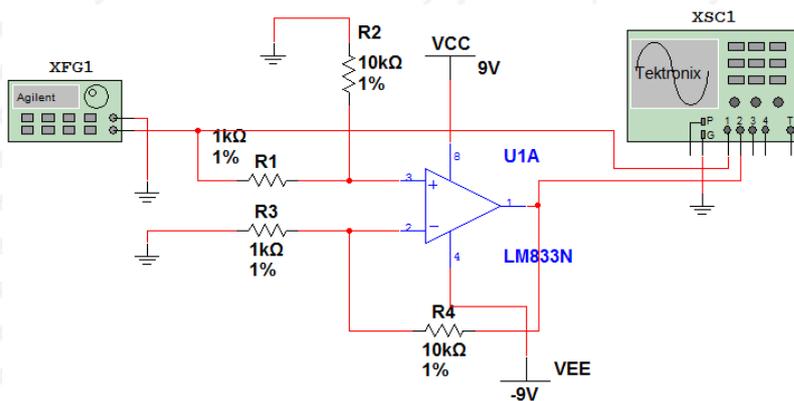
Tujuan pengujian rangkaian penguat tahap akhir ini adalah untuk mengetahui apakah sinyal keluaran berada dalam daerah kerja yang diperkenankan pada masukan rangkaian ADC pada saat tegangan masukan berkisar antara -0,06 V hingga 0,06V. Alat bantu yang digunakan adalah sumber tegangan DC serta *function generator* yang dapat diatur besarnya sebagai tegangan masukan dan osiloskop untuk melihat sinyal keluaran.

Prosedur pengujian yang dilakukan adalah:

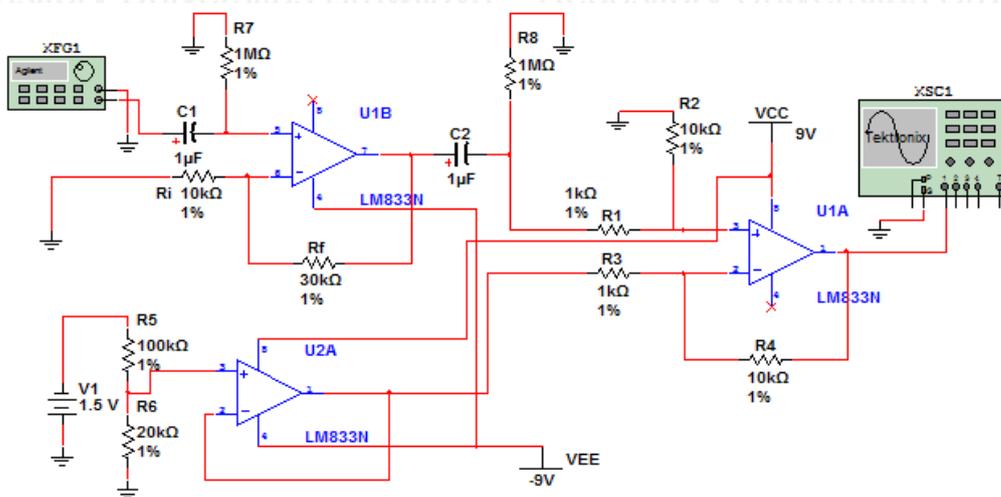
- Alat dirangkai seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.7
- Sinyal masukan pada masukan non-inverting diubah-ubah.
- Mencatat besar tegangan keluaran tiap rangkaian.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 7 Rangkaian Pengujian a) Penguat non inverting b) Penguat differensial c) Keseluruhan

Pada pengujian telah didapatkan data-data seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.6, 4.7, 4.8.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Penguat non inverting

$V_{in}(V_{p-p}(mV))$	$V_{out}(V_{p-p}(V))$	<i>Gain</i>
106	408	3,849057
240	1000	4,166667
288	1160	4,027778
400	1550	3,875
520	2120	4,076923
1000	3880	3,88
Rata-Rata <i>Gain</i>		3,979237

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Penguat Differential

$V_{in}(V_{p-p}(mV))$	$V_{out}(V_{p-p}(V))$	<i>Gain</i>
120	1,1	9,166667
140	1,3	9,285714
200	1,96	9,8
300	2,84	9,466667
408	3,92	9,607843
600	5,8	9,666667
1070	10,4	9,719626
Rata-Rata <i>Gain</i>		9,530455

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Penguat Keseluruhan

$V_{in}(V_{p-p}(mV))$	$V_{out}(V)$		$V_{out}(V_{p-p}(V))$	<i>Gain</i>
	Minimum	Maximum		
60	1,28	3,52	2,24	37,33
80	0,95	3,92	2,97	37,125
100	0,56	4,32	3,76	37,6
110	0,44	4,58	4,14	37,64
124	0,3	4,91	4,62	37,18
Rata-Rata <i>Gain</i>				37,375

Dari Tabel 4.6 terlihat bahwa *gain* yang dirancang untung penguat non inverting sebesar 4 kali ternyata memberikan hasil hanya 3,98 setelah melakukan pengujian. Terdapat kesalahan sebesar

$$\text{Gain Error} = \frac{4 - 3,98}{4} \times 100 = 0,5\%.$$

Dari Tabel 4.7 terlihat bahwa *gain* yang dirancang untuk penguat differential sebesar 10 kali ternyata memberikan hasil hanya 9,5 setelah melakukan pengujian. Terdapat kesalahan sebesar

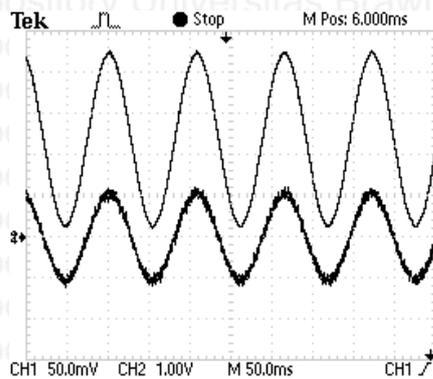
$$\text{Gain Error} = \frac{10 - 9,5}{10} \times 100 = 5\%.$$

Error diakibatkan oleh adanya toleransi komponen yang digunakan.

Dari Tabel 4.8 terlihat bahwa *gain* yang dirancang untuk penguatan keseluruhan sebesar 40 kali ternyata memberikan hasil hanya 37,375 setelah melakukan pengujian. Terdapat kesalahan sebesar

$$\text{Gain Error} = \frac{40 - 37,375}{40} \times 100 = 6,56\%.$$

Error diakibatkan oleh adanya toleransi komponen yang digunakan. Tabel 4.8 juga memperlihatkan bahwa rangkaian mampu membuat sinyal keluaran antara 03-4,9V (tidak ada ayunan negatif) sebelum masuk ke dalam ADC.



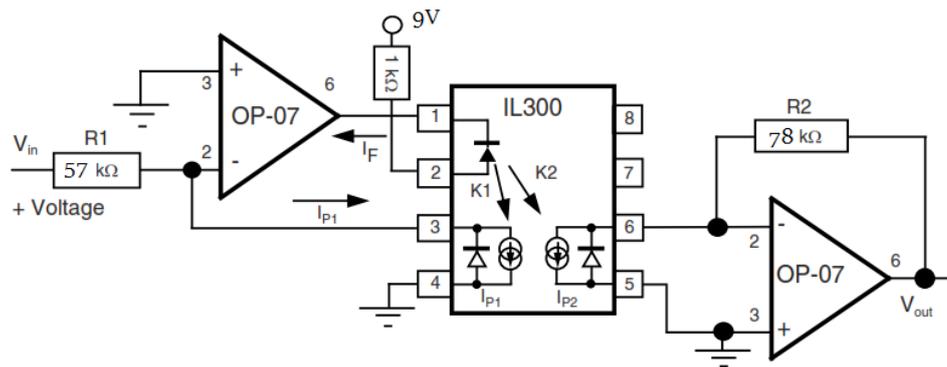
Gambar 4. 8 Sinyal Keluaran Penguat Dibandingkan Sinyal Masukannya

4.1.4 Hasil dan Analisis Pengujian Analog Optocoupler

Parameter pengujian rangkaian analog optocoupler ini adalah untuk mengetahui apakah rangkaian dapat memberikan tegangan keluaran linear dengan tegangan masukan. Alat bantu yang digunakan adalah sumber tegangan DC serta *DC regulator* yang dapat diatur besarnya sebagai tegangan masukan dan multimeter untuk melihat tegangan keluaran dan tegangan masukan.

Prosedur pengujian yang dilakukan adalah:

- Alat dirangkai seperti ditunjukkan dalam Gambar 4.9
- Sinyal masukan pada V_{in} diubah-ubah.
- Mencatat besar tegangan keluaran rangkaian.



Gambar 4. 9 Rangkaian pengujian Analog optocoupler

Pada pengujian telah didapatkan data-data seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Rangkaian Analog Optocoupler

$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	<i>Gain</i>
0,5	0,53	1,06
1,011	1,019	1,008
1.5	1,511	1,007
2,007	2,010	1,0015
2.506	2,514	1,0032
3,008	2,999	0,997
3.503	3,473	0,9914
4,01	3,99	0,995
4,5	4,48	0,9956
5	4,94	0,988
Gain rata-rata		1.00467

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *gain* rata-rata sebesar 1,00467, sedangkan *gain* yang dirancang adalah sebesar 1 kali. Berarti terdapat penyimpangan sebesar :

$Error\ Gain = \frac{1-1,00467}{1} \times 100\% = 0.467\%$. Error terjadi karena adanya toleransi dari resistor eksternal yang dipakai.

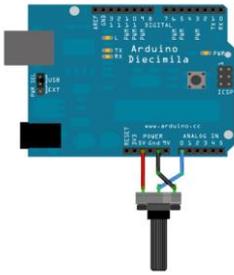
Dari Tabel 4.9 dapat dilihat bahwa tegangan keluaran mendekati dengan tegangan masukan, hal ini sesuai dengan perancangan. Rangkaian ini digunakan sebagai rangkaian isolasi dari rangkaian keseluruhan dengan komputer.

4.1.5 Hasil dan Analisis Pengujian Arduino

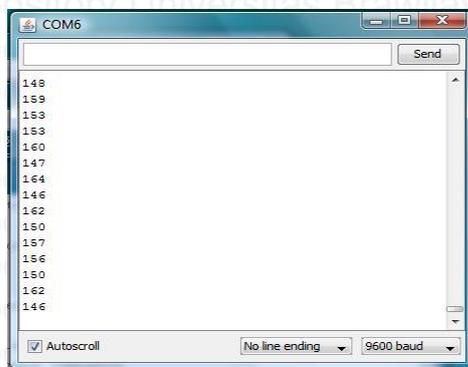
Pengujian arduino dilakukan untuk menguji ADC dari arduino serta transfer serialnya.

Karena menggunakan 10 bit ADC maka nilai diskrit keluaran arduino berkisar 0-1023.

Arduino dirangkai seperti pada Gambar 4.10. Dengan memutar potensiometer secara perlahan akan mengubah nilai bacaan ADC yang ditampilkan di Serial monitor. Hasil bacaan nilai analog dan dikirimkan secara serial memperlihatkan nilai yang berubah step demi step seperti pada gambar 4.11.



Gambar 4. 10 Pengujian Arduino



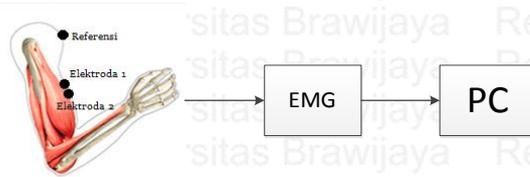
Gambar 4. 11 Hasil Serial Transfer Arduino

4.2 Hasil dan Analisis Pengujian Seluruh Sistem

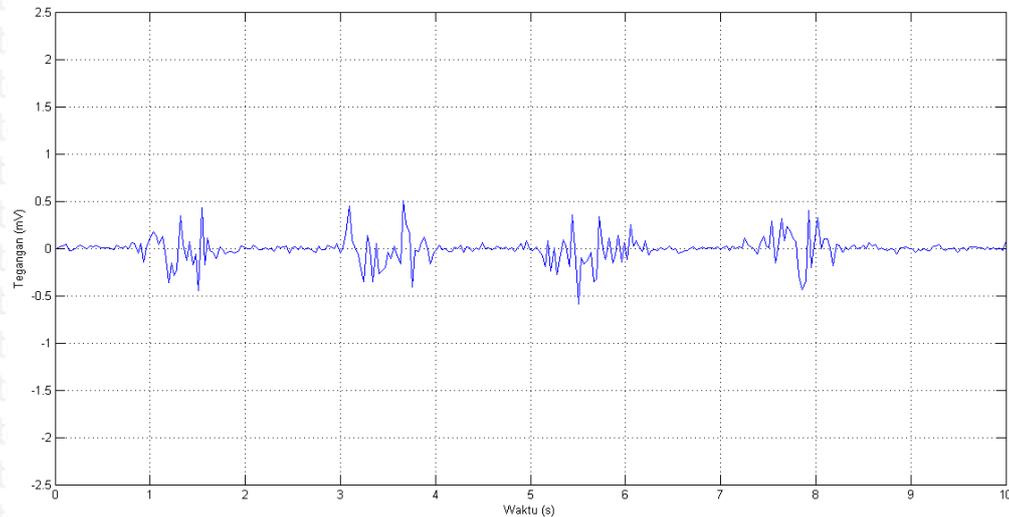
Pengujian seluruh sitem ini bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja perangkat keras dan perangkat lunak serta untuk mengetahui pengaruh besarnya kekuatan dengan amplitudo sinyal yang dihasilkan.

Langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut :

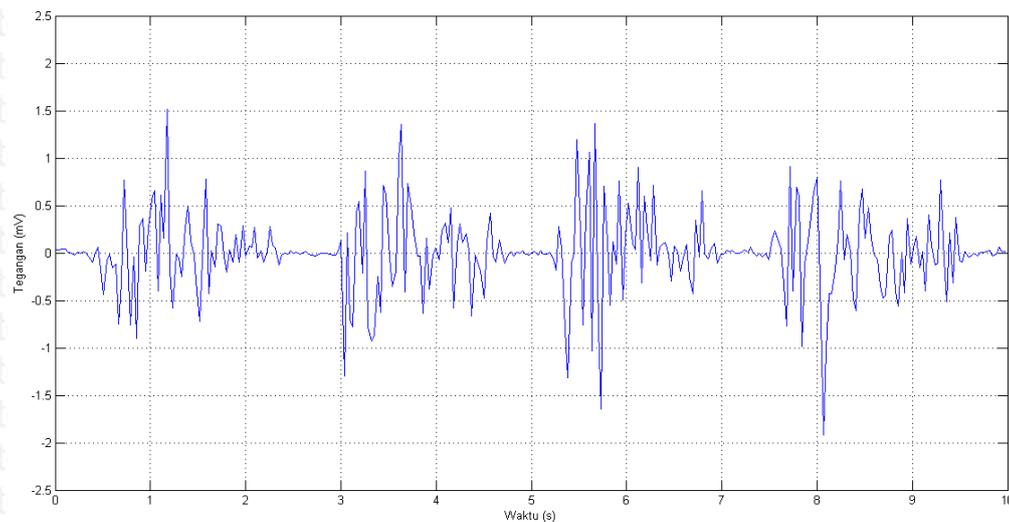
- a. Alat dirangkai seperti gambar 4.12.
- b. Mengambil data dari subyek dengan menempelkan elektrode pada lengan atas dengan jarak antar elektrode sebesar 2cm dan elektrode referensi pada bahu.
- c. Menggerakkan lengan bawah mendekati bahu tanpa menggunakan beban sebanyak 4 kali gerakan.
- d. Menampilkan data dalam bentuk grafik pada komputer.
- e. Menggerakkan lengan bawah mendekati bahu dengan menggunakan beban sebanyak 4 kali gerakan.
- f. Menampilkan data dalam bentuk grafik pada komputer.
- g. Mengamati bentuk sinyal pada komputer.



Gambar 4.12 Pengujian Perangkat EMG



(a)



(b)

Gambar 4.13 Sinyal EMG ketika lengan digerakkan (a) tanpa membawa beban, (b) membawa beban

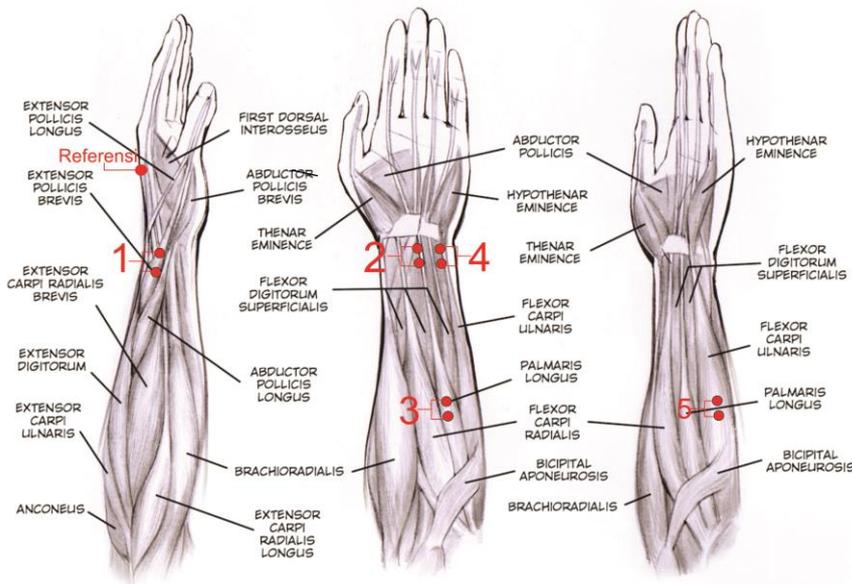
Gambar hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.13. gerakan lengan tanpa membawa beban menghasilkan amplitude sinyal sebesar 0,5mV setiap gerakan, sedangkan ketika dengan beban menghasilkan alplitudo sinyal mencapai 1,5mV. Terdapat perbedaan besar amplitude, hal ini dikarenakan dengan adanya beban maka otot yang berkontraksi akan semakin banyak agar dapat menggerakkan lengan. Semakin berat beban yang diberikan makan amplitudo sinyal akan semakin besar. Dari hasil percobaan dapat dilihat bahwa system EMG yang telah dibuat dapat bekerja, serta kekuatan mempengaruhi amplitude sinyal EMG yang direkam.

4.2.1 Hasil dan Analisis Pengujian Otot Penggerak Jari

Pengujian seluruh sistem ini bertujuan untuk mengetahui unjuk kerja perangkat keras dan perangkat lunak. Hasil akan diamati yaitu dengan melihat grafik sinyal.

Langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut :

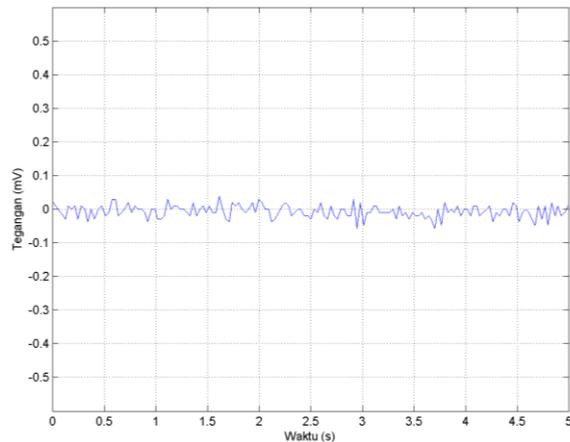
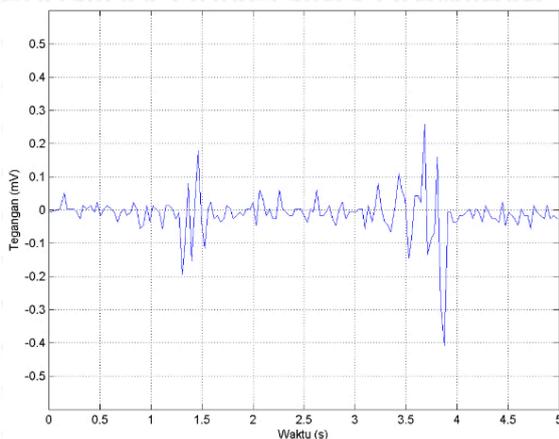
- Alat dirangkai seperti gambar 4.12.
- Mengambil data dari subyek dengan menempelkan elektrode-elektrode sesuai dengan gambar 4.14, di mana jarak antar elektrode sebesar 2cm.
- Menggerakkan jari satu persatu sebanyak 2-3 kali.
- Menampilkan data dalam bentuk grafik untuk setiap jari pada masing masing posisi elektrode pada komputer.
- Mengamati bentuk sinyal pada komputer.

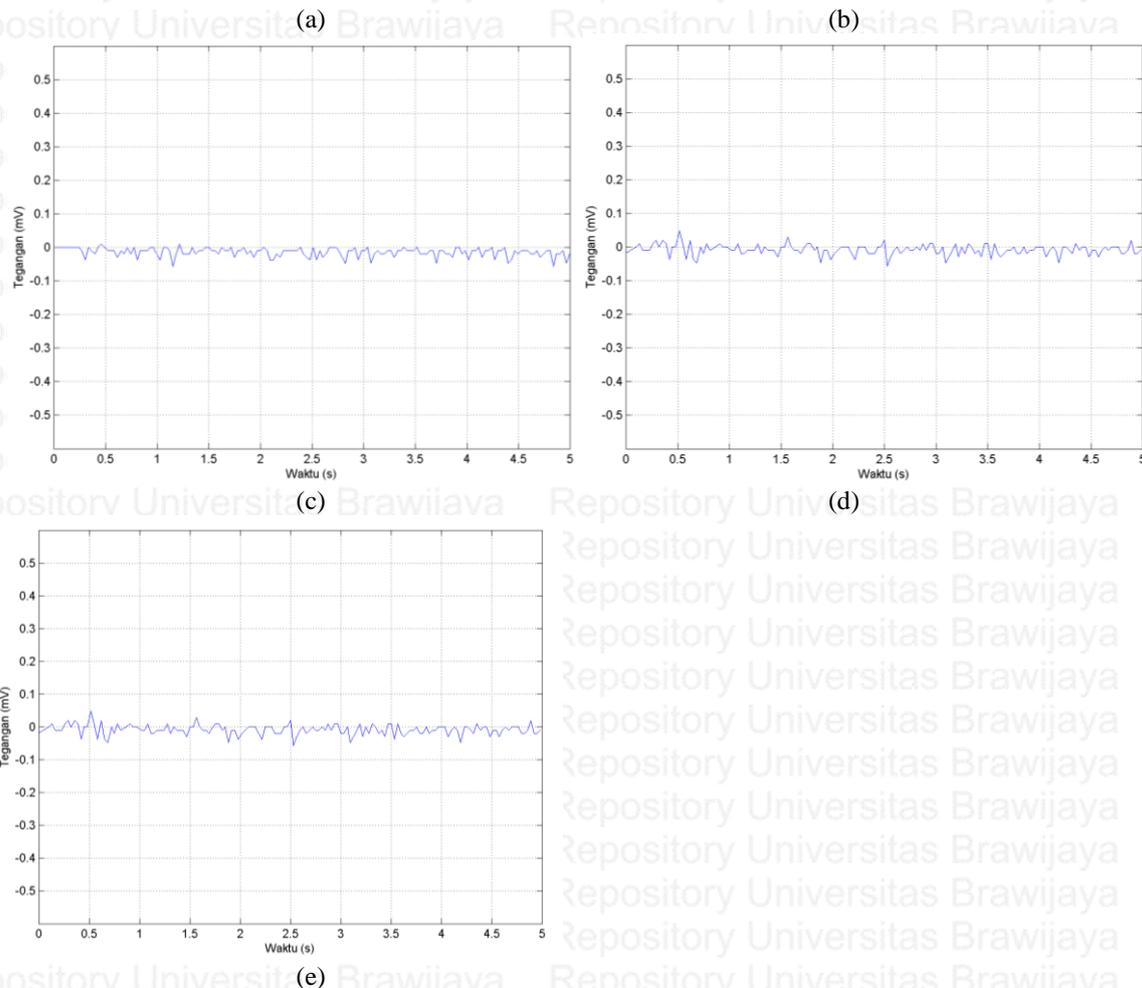


Gambar 4. 14 Letak Elektrode

Percobaan pertama dilakukan dengan meletakkan elektrode pada posisi 1 sesuai Gambar

4.14, lalu menggerakkan jari satu persatu.

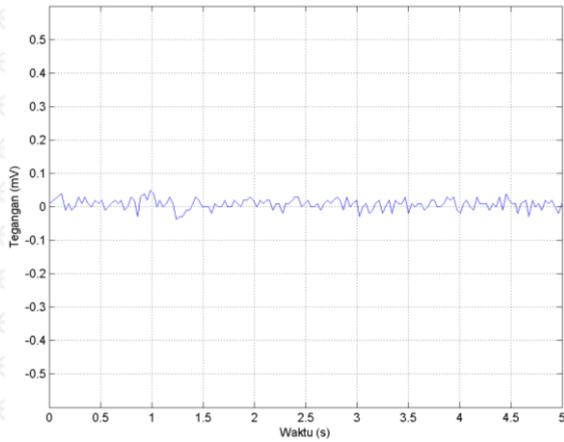




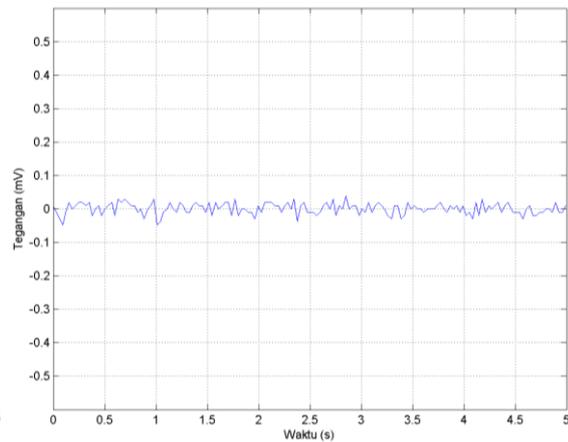
Gambar 4. 15 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking di gerakkan dengan elektrode diposisi 1

Gambar hasil pengujian ketika elektrode berada pada posisi nomor 1 ditunjukkan pada Gambar 4.15. Gerakan yang dilakukan oleh jari telunjuk, jari tengah, jari manis dan jari kelingking tidak memberikan perubahan amplitudo pada sinyal EMG dan ditunjukkan dengan Gambar 4.15 b,c,d,e. Gerakan ibu jari menghasilkan perubahan amplitudo pada sinyal EMG, perubahan amplitudo dikarenakan adanya kontraksi motor unit otot. Amplitudo tegangan gerakan ibu jari mencapai 0,25mV dan -0,4mV. Otot yang disadap pada daerah nomor 1 merupakan *extensor policis brevis*, yang berfungsi untuk menggerakkan ibu jari menjauhi telapak tangan.

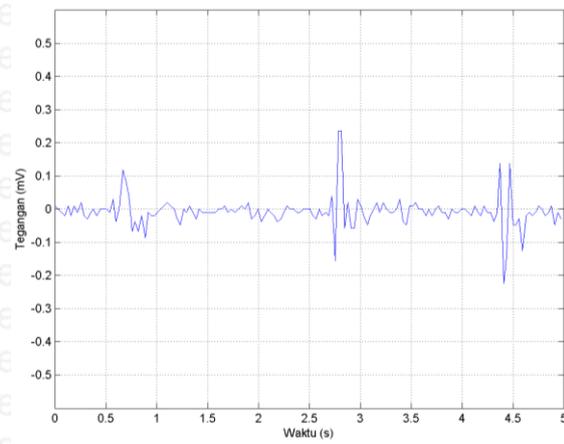
Percobaan kedua dilakukan dengan meletakkan elektrode pada posisi 2 sesuai Gambar 4.14, lalu menggerakkan jari satu persatu.



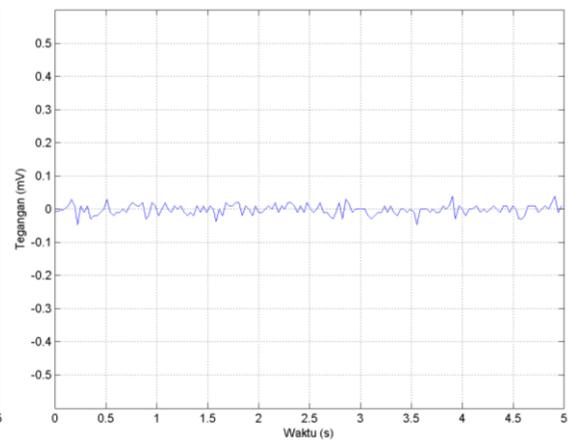
(a)



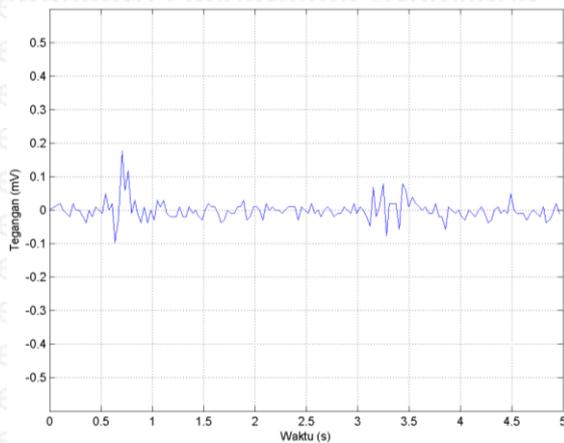
(b)



(c)



(d)



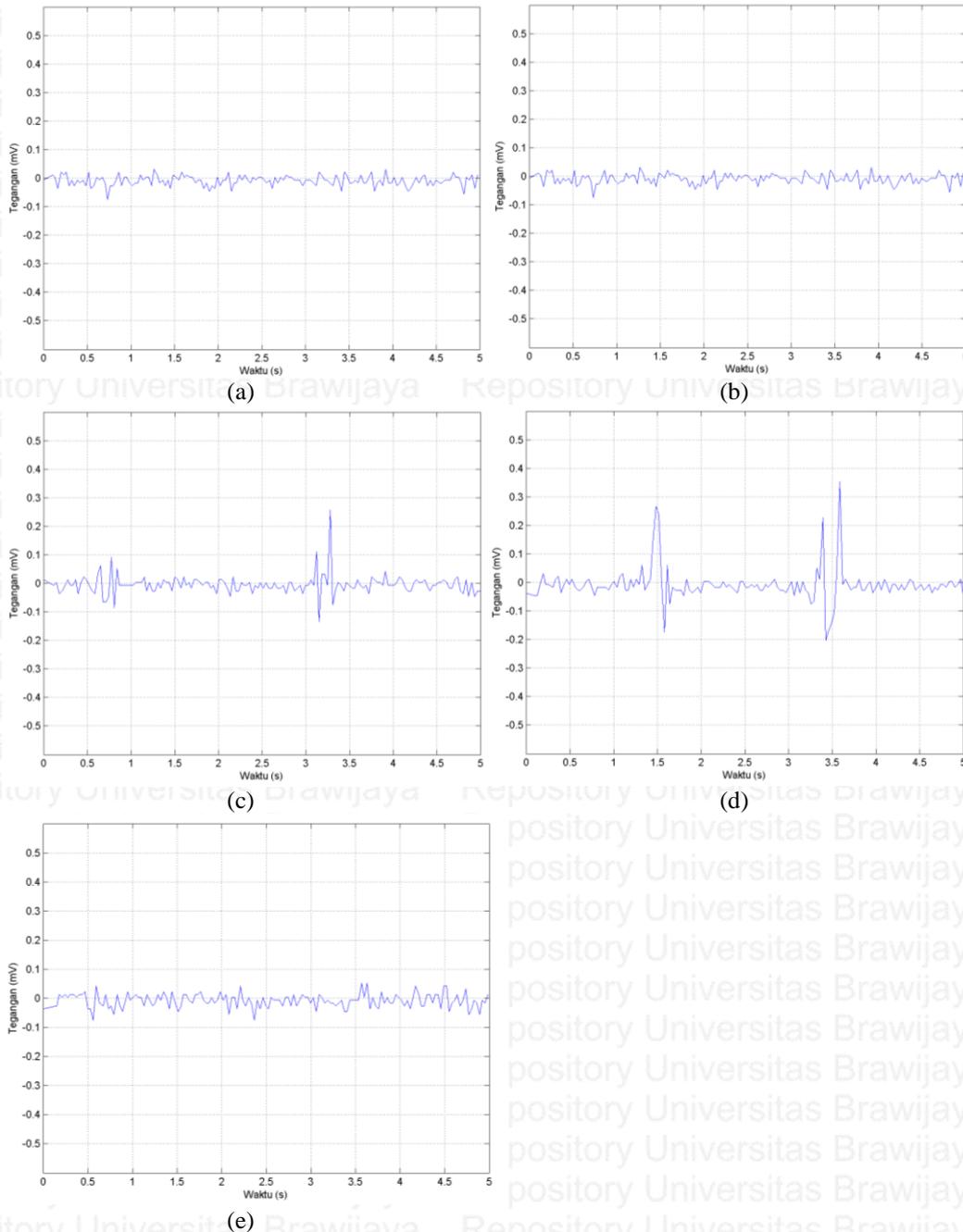
(e)

Gambar 4. 16 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 2

Gambar hasil pengujian ketika elektrode berada pada posisi nomor 2 ditunjukkan pada Gambar 4.16. Gerakan yang dilakukan oleh ibu jari, jari telunjuk dan jari manis tidak memberikan perubahan amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.16 a,b,d. Gerakan jari tengah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.16 c, terdapat perubahan amplitudo sinyal EMG sebanyak 3 kali. Amplitudo sinyal terbesar yang didapat adalah 0,25 mV pada gerakan jari tengah. Gerakan jari kelingking juga menghasilkan perubahan

amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.16 e, namun amplitudo yang dihasilkan lebih lemah dari amplitudo yang dihasilkan dari pergerakan jari tengah. Otot yang ingin disadap pada daerah nomor 2 merupakan *flexor digitorum superficialis*, dan dari pengujian daerah sadapan nomor 2 terjadi perubahan amplitudo pada sinyal EMG ketika jari tengah dan jari kelingking bergerak.

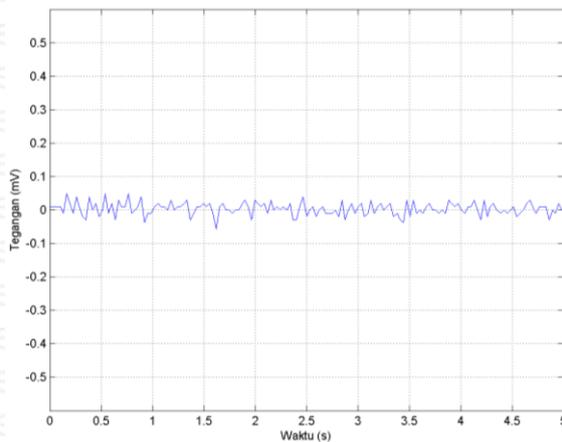
Percobaan ketiga dilakukan dengan meletakkan elektrode pada posisi 3 sesuai Gambar 4.14, lalu menggerakkan jari satu persatu.



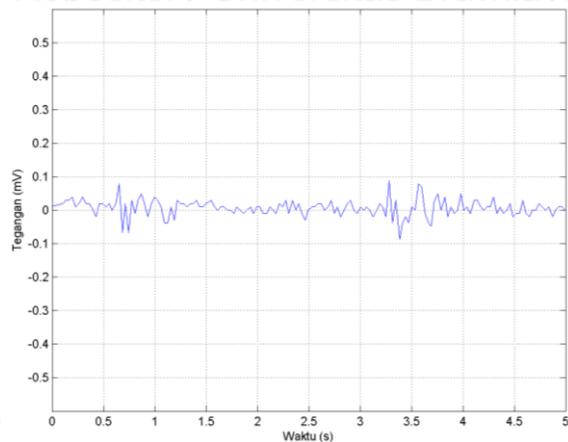
Gambar 4. 17 Sinyal EMG ketika digerakkan (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 3

Gambar hasil pengujian ketika elektrode berada pada posisi nomor 3 ditunjukkan pada Gambar 4.17. Gerakan yang dilakukan oleh ibu jari, jari telunjuk dan jari kelingking tidak memberikan perubahan amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17 a,b,e. Gerakan jari tengah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17 c, terdapat perubahan amplitudo sinyal EMG sebanyak 2 kali dengan amplitudo yang berbeda. Amplitudo sinyal terbesar yang didapat adalah 0,27 mV pada gerakan jari tengah. Gerakan jari manis juga menghasilkan perubahan amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17 d, amplitudo yang dihasilkan mempunyai nilai yang lebih besar dari hasil sinyal emg ketika jari tengah digerakkan. Otot yang ingin disadap pada daerah nomor 3 merupakan *flexor palmaris longus*, dan dari pengujian daerah sadapan nomor 3 terjadi perubahan amplitudo pada sinyal EMG ketika jari tengah dan jari manis bergerak, dengan besar amplitudo yang berbeda .

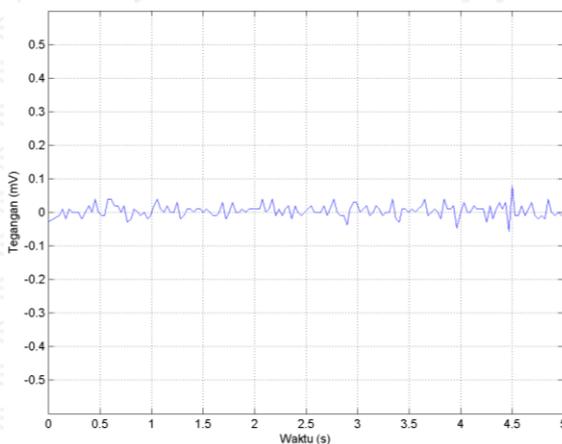
Percobaan keempat dilakukan dengan meletakkan elektrode pada posisi 4 sesuai Gambar 4.14, lalu menggerakkan jari satu persatu.



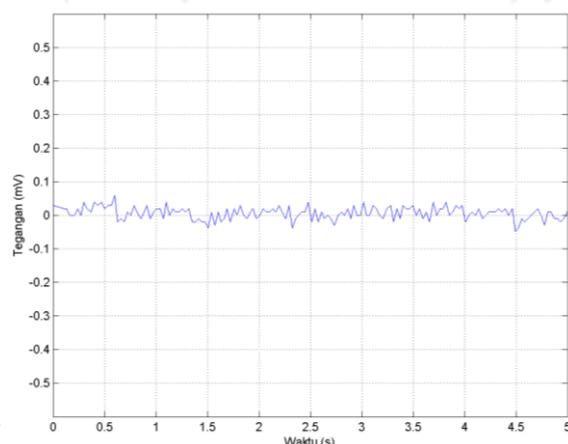
(a)



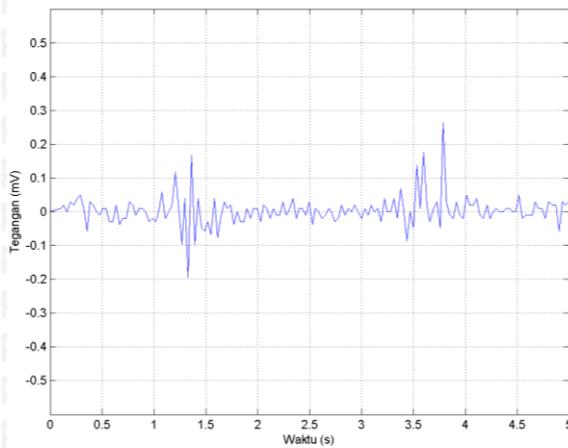
(b)



(c)



(d)

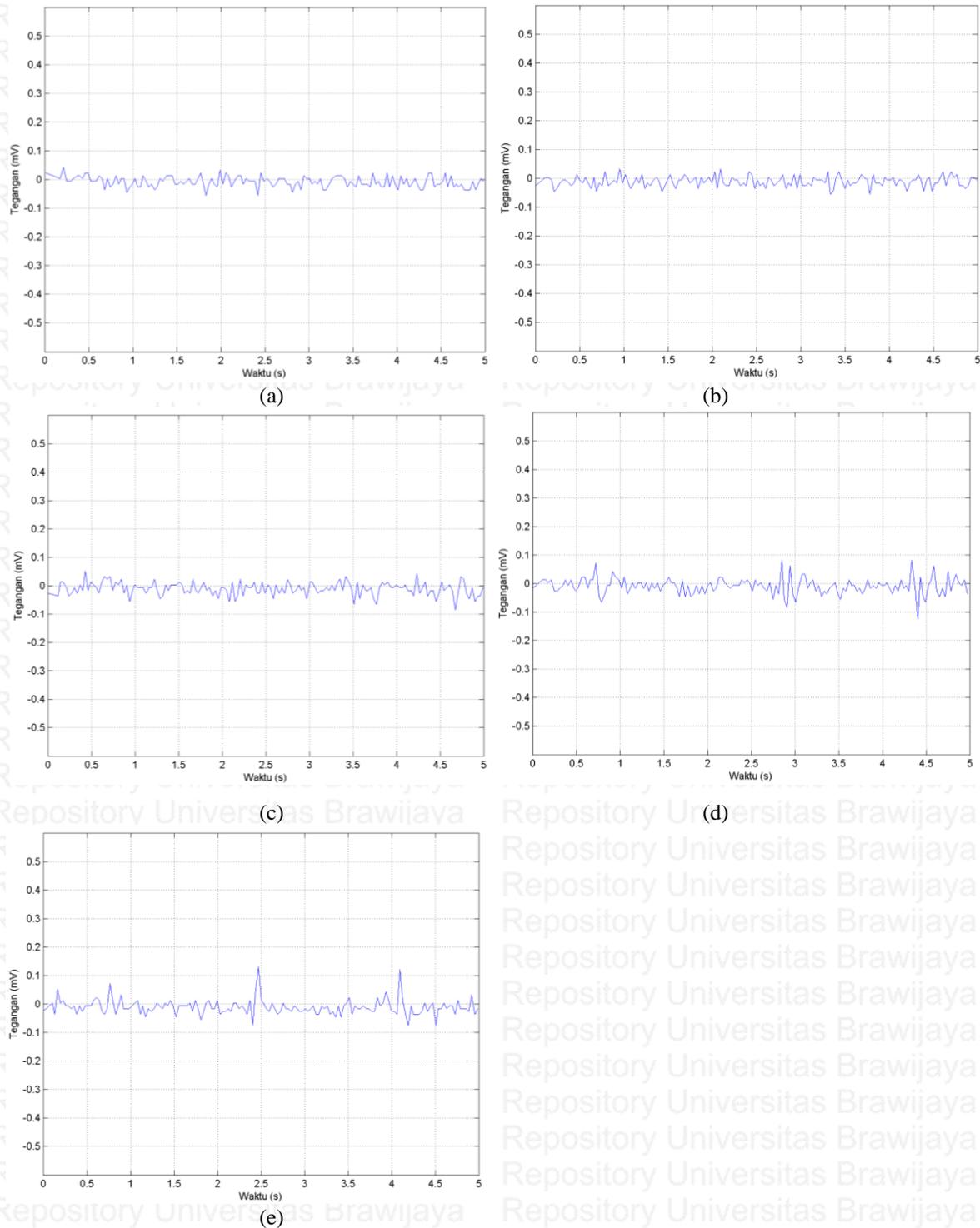


(e)

Gambar 4. 18 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 4

Gambar hasil pengujian ketika elektrode berada pada posisi nomor 4 ditunjukkan pada Gambar 4.18. Gerakan yang dilakukan oleh ibu jari, jari tengah dan jari manis tidak memberikan perubahan amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18 a,c,d. Gerakan jari telunjuk seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18 b, terdapat perubahan amplitudo sinyal EMG sebanyak 2 kali dengan amplitudo yang berbeda. Amplitudo sinyal terbesar yang didapat adalah 0,09 mV pada gerakan jari telunjuk. Gerakan jari kelingking juga menghasilkan perubahan amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.18 e, amplitudo yang dihasilkan mempunyai nilai yang besar dari hasil sinyal EMG ketika jari manis digerakkan, dengan nilai amplitudo maksimum 0,27 mV. Otot yang ingin disadap pada daerah nomor 4 merupakan *flexor digitorum superficialis*, dan dari pengujian daerah sadapan nomor 4 terjadi perubahan amplitudo pada sinyal EMG ketika jari telunjuk dan jari kelingking bergerak, dengan besar amplitudo gerakan jari kelingking lebih besar.

Percobaan kelima dilakukan dengan meletakkan elektrode pada posisi 5 sesuai Gambar 4.14, lalu menggerakkan jari satu persatu.



Gambar 4. 19 Sinyal EMG ketika (a) ibu jari, (b) jari telunjuk, (c) jari tengah, (d) jari manis, (e) jari kelingking digerakkan dengan elektrode diposisi 5

Gambar hasil pengujian ketika elektrode berada pada posisi nomor 5 ditunjukkan pada Gambar 4.19. Gerakan yang dilakukan oleh ibu jari, jari telunjuk dan jari tengah tidak memberikan perubahan amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19 a,b,c. Gerakan jari manis seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19 d, terdapat perubahan amplitudo sinyal EMG. Amplitudo sinyal terbesar yang didapat adalah 0,09 mV pada

gerakan jari manis. Gerakan jari kelingking juga menghasilkan perubahan amplitudo pada sinyal EMG seperti ditunjukkan pada Gambar 4.19 e, amplitudo yang dihasilkan mempunyai nilai yang lebih besar dari hasil sinyal EMG ketika jari manis digerakkan, dengan nilai amplitudo maksimum 0,12mV. Otot yang ingin disadap pada daerah nomor 5 merupakan *flexor carpi ulnaris*, dan dari pengujian daerah sadapan nomor 5 terjadi perubahan amplitudo pada sinyal EMG ketika jari manis dan jari kelingking bergerak, dengan besar amplitudo gerakan jari kelingking lebih besar.

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, pada sadapan nomor 1, terdapat satu jari saja yang ketika digerakkan menimbulkan perubahan pada amplitudo sinyal EMG, yaitu ibu jari, hal ini dikarenakan otot yang disadap memang berguna untuk menggerakkan ibu jari secara spesifik untuk menggerakkan ibu jari menjauhi telapak tangan.

Hasil pengujian pada sadapan nomor 2, 3, 4 dan 5 masing-masing terdapat dua jari yang dapat memberikan perubahan pada amplitudo sinyal EMG hal ini disebabkan karena letak otot yang berdekatan, sehingga ketika dilakukan penyadapan bisa terdapat error di mana elektrode yang diletakkan juga dapat menyadap otot yang tidak dituju. Selain itu diameter elektrode juga berpengaruh, dengan ukuran yang lebih kecil dapat dilakukan penyadapan dengan lebih spesifik. Selain itu terdapat 1 otot besar yang berperan dalam dalam pergerakan jari, telunjuk, tengah, manis, dan kelingking, yaitu *flexor digitorum superficialis*. Sehingga tidak didapatkan otot penggerak masing-masing jari pada daerah yang disadap di lengan bawah.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perencanaan, pembuatan dan pengujian yang telah dilakukan terhadap alat baik pengujian pada sub-sistem maupun pengujian seluruh sistem, maka dapat disusun kesimpulan sebagai berikut:

1. Penguatan yang diberikan diberikan 3 tahap mulai dari penguat instrumentasi AD620 dengan 12,21 kali dengan *error* 0,163% dan CMRR 106,33 dB, penguat non inverting sebesar 3.98 kali, *error* 0,5%. Penguat diferensial memberikan sinyal keluaran berada dalam daerah kerja yang diperkenankan pada masukan Arduino 0-5V (tidak ada ayunan negatif) dengan penguatan sebesar 9,5 kali dan *error* 5%. Serta untuk isolasi terdapat rangkaian analog optocoupler dengan penguatan 1,00467 dan *error* 0.467%.
2. Desain instrumentasi menggunakan filter. Rangkaian filter yang digunakan adalah rangkaian *low pass filter* dengan frekuensi *cut off* 506 Hz dan *error* sebesar 1,2%, serta rangkaian *high pass filter* dengan frekuensi *cut off* 22.1 Hz dan *error* sebesar 10.5%. Besar *error* pada high pass filter tidak berpengaruh dikarenakan terdapat noise dari elektrode pada frekuensi 20Hz. Serta ditambahkan *high pass filter* RC pada bagian masukan dan keluaran penguat non inverting untuk menghilangkan *DC offset*.
3. Pembacaan grafik sinyal biolistrik otot selama pengujian dapat terlihat jelas karakteristik sinyal otot. Adanya beban yang diberikan membuat amplitude pada sinyal EMG akan semakin besar dikarenakan semakin banyak unit otot yang berkontraksi untuk melakukan suatu gerakan.
4. Dari 5 letak sadapan yang dilakukan pada lengan bawah bagian anterior didapatkan bahwa otot *extensor policis brevis*, menggerakkan ibu jari menjauhi telapak tangan. Otot *flexor digitorum superficialis* berperan untuk menggerakkan jari tengah dan jari kelingking. Otot *flexor palmaris longus* berperan untuk menggerakkan jari tengah dan jari manis, otot *flexor digitorum superficialis* yang dekat dengan jari kelingking:

berperan untuk menggerakkan jari telunjuk dan jari kelingking. Otot *flexor carpi ulnaris* berperan untuk menggerakkan jari manis dan jari kelingking. Sehingga hanya didapatkan otot yang hanya menggerakkan ibu jari pada lengan bagian dalam, dan tidak didapatkan otot spesifik yang menggerakkan jari yang spesifik lainnya pada daerah yang disadap.

5.2 Saran

Meskipun alat telah dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan, namun ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dikemudian hari. Hal-hal tersebut antara lain

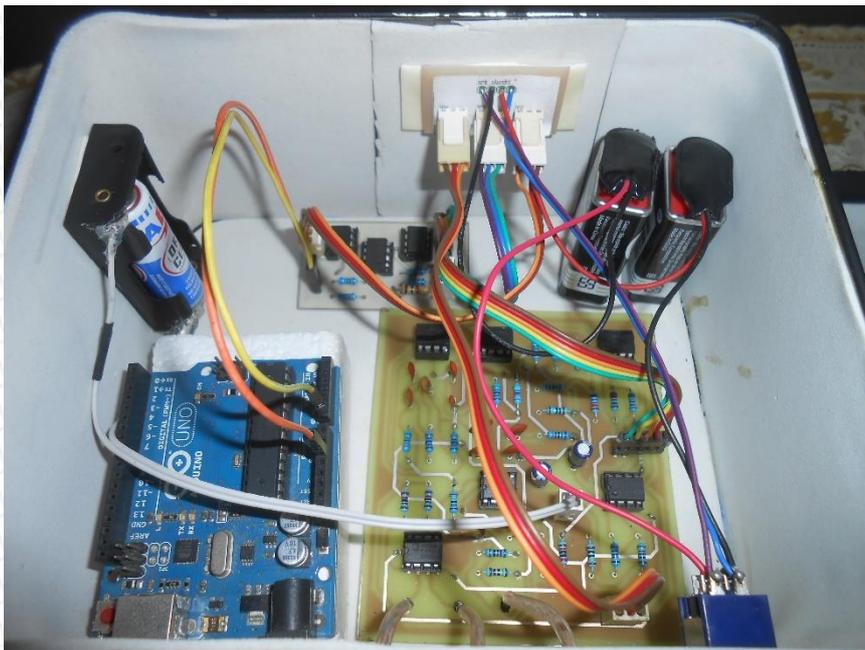
1. Sinyal EMG diolah lebih lanjut dengan menggunakan filter digital untuk menghilangkan *noise* terutama noise dari tegangan jala-jala, sehingga mendapatkan sinyal yang lebih bersih .
2. Membuat lebih dari satu *channel* sehingga mampu mendeteksi lokasi sadapan lebih dari satu.
3. Untuk menambah kualitas sadapan juga disarankan memakai elektrode jarum terutama untuk keperluan medis.
4. Letak otot penggerak jari dapat digunakan sebagai referensi untuk menggerakkan lengan robot.
5. Untuk menambah data maka dapat melakukan percobaan dengan pola lebih dari satu jari.

DAFTAR PUSTAKA

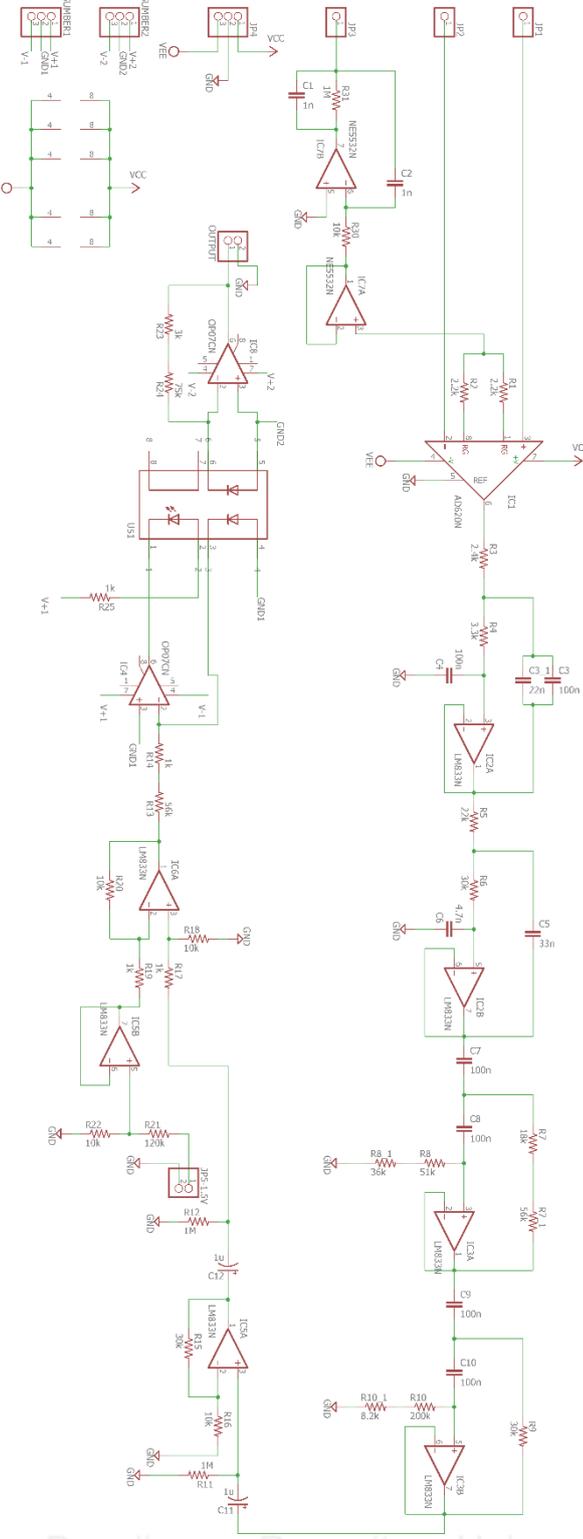
- Atmel.2010.ATMEga328 Datasheet. San Jose: Atmel Corporation
- Benning, M . 2003. *The Experimental Portable EEG/EMG Amplifier*. Universitas Victoria.
- Campbell, N. A. 2009. *Biology* . Pearson.
- Chen, W. K . 1986. *Passive and Active Filters : Theory and Implementations* . John Wiley & Sons .
- Clayton, G., dan Winder,S . 2003. *Operational Amplifiers* . Penerbit Erlangga
- Coughlin , R. F., & Driscoll, F. F. (1982). *Penguat Operasional dan Rangkaian Terpadu Linear*. Erlangga.
- Fournier, R. L. 2012. *Basic Transport Phenomena in Biomedical Engineering Third edition*. New York: CRC Press.
- Kugelstadt, T. 2005. Getting the most out of your instrumentation amplifier design . *Analog Applications Journal*.
- Mancini, R. 2002. *Op-Amp For Everyone : Design Reference* .Texas Instrumentation.
- Merletti, R., dan Parker, A. P .2010. *Electromyography*. John Wiley&Sons.
- Moritani, T., Stegeman, D., & Merletti, R. 2005. *Basic Physiology and Biophysics of EMG Signal Generation Electromyography* (pp. 1-25): John Wiley & Sons, Inc.
- Sumartono, H., Chaeruzzaini, & Siwindarto,P. 1995. *Perencanaan dan Pembuatan Alat Pengukur Aktivitas Otot (Elektromiogram)*. Skripsi tidak diterbitkan. Malang: S1 Universitas Brawijaya.
- Tanpa nama. 2002. *Analysis of Sallen Key Architecture* . Texas Instrument
- Tanpa nama. 2013. *Arduino*. <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Diakses tanggal 20 Oktober 2016
- Tatsuo, T., Tamura, T., & Oberg, P. A. (2011). *Biomedical Sensor and Instrumentation second edition*. New York: CRC press.
- Webster, J. G. 1998. *Medical Instrumentation: Application and Design*. John Wiley&Sons
- Zumbahlehn, H . 2008. *Linear Circuit Design Handbook*. Elsevier.



Tampak depan



Tampak atas



Repository Universitas Brawijaya

LISTING PROGRAM PENGUJIAN ARDUINO

```
int pintAnalog1= A1;
void setup ()
{Serial.begin(9600);}
void loop ()
{nilai_x= analogRead(pinAnalog1);
Serial.print (nilai_x);}
```

LISTING PROGRAM MATLAB

```
function EMG(name)
limittime=5;
a=arduino('COM3');
i=0;
gbname= ['kekuatan ',num2str(name),'.fig']; % pemberian nama figure
filename= ['kekuatan ',num2str(name),'.xls']; % pemberian nama excel
imagenam= ['kekuatan ',num2str(name),'.png']; % pemberian nama gambar
tic; %start internal stopwatch
while(toc<limittime)
i=i+1;
t(i)=toc;
b(i)=(a.analogRead(0)*10/1024)-5.28;
plot(t,b);
grid on;
axis([0,limittime,-5,5]);
ylabel('Tegangan (mV)');
xlabel('Waktu (s)');
%title();
drawnow
end
delete(a);
```



```
saveas(gca,imagenam);
```

```
saveas(gca,gbrname);
```

```
C=b.%; %Mengubah baris menjadi kolom, agar data lebih banyak yang dapat dicatat
```

```
D=t.%; %Mengubah baris menjadi kolom
```

```
xlswrite(filename, {'Waktu (s)', 'Tegangan (mV)'});
```

```
xlswrite(filename, D, 'Sheet1', 'A2');
```

```
xlswrite(filename, C, 'Sheet1', 'B2');
```




LAMPIRAN 3 DATASHEET



Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier

AD620

FEATURES

Easy to use

- Gain set with one external resistor
(Gain range 1 to 10,000)
- Wide power supply range (± 2.3 V to ± 18 V)
- Higher performance than 3 op amp IA designs
- Available in 8-lead DIP and SOIC packaging
- Low power, 1.3 mA max supply current
- Excellent dc performance (B grade)
- 50 μ V max, input offset voltage
- 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, input offset drift
- 1.0 nA max, input bias current
- 100 dB min common-mode rejection ratio (G = 10)

Low noise

- 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz, input voltage noise
- 0.28 μ V p-p noise (0.1 Hz to 10 Hz)

Excellent ac specifications

- 120 kHz bandwidth (G = 100)
- 15 μ s settling time to 0.01%

APPLICATIONS

- Weigh scales
- ECG and medical instrumentation
- Transducer interface
- Data acquisition systems
- Industrial process controls
- Battery-powered and portable equipment

CONNECTION DIAGRAM

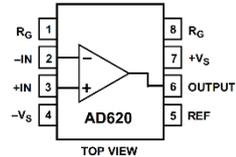


Figure 1. 8-Lead PDIP (N), CERDIP (Q), and SOIC (R) Packages

PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to 10,000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery-powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50 μ V max, and offset drift of 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weigh scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications, such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of SuperBeta processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz, 0.28 μ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, and 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15 μ s to 0.01%, and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

Table 1. Next Generation Upgrades for AD620

Part	Comment
AD8221	Better specs at lower price
AD8222	Dual channel or differential out
AD8226	Low power, wide input range
AD8220	JFET input
AD8228	Best gain accuracy
AD8295	+2 precision op amps or differential out
AD8429	Ultra low noise

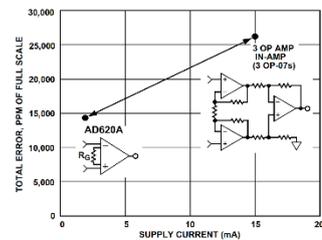


Figure 2. Three Op Amp IA Designs vs. AD620

Rev. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.326.8703 © 2003–2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

AD620

SPECIFICATIONS

Typical @ 25°C, $V_S = \pm 15\text{ V}$, and $R_I = 2\text{ k}\Omega$, unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN											
Gain Range	$G = 1 + (49.4\text{ k}\Omega/R_G)$	1		10,000	1		10,000	1		10,000	
Gain Error ²	$V_{OUT} = \pm 10\text{ V}$										
$G = 1$			0.03	0.10		0.01	0.02		0.03	0.10	%
$G = 10$			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
$G = 100$			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
$G = 1000$			0.40	0.70		0.35	0.50		0.40	0.70	%
Nonlinearity	$V_{OUT} = -10\text{ V to } +10\text{ V}$										
$G = 1-1000$	$R_L = 10\text{ k}\Omega$		10	40		10	40		10	40	ppm
$G = 1-100$	$R_L = 2\text{ k}\Omega$		10	95		10	95		10	95	ppm
Gain vs. Temperature											
$G = 1$				10			10			10	ppm/°C
Gain $> 1^2$				-50			-50			-50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET											
(Total RTI Error = $V_{OSI} + V_{OSO}/G$)											
Input Offset, V_{OSI}	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		30	125		15	50		30	125	μV
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			185			85			225	μV
Average TC	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		0.3	1.0		0.1	0.6		0.3	1.0	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Output Offset, V_{OSO}	$V_S = \pm 15\text{ V}$		400	1000		200	500		400	1000	μV
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$			1500			750			1500	μV
Average TC	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		5.0	15		2.5	7.0		5.0	15	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)	$V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 18\text{ V}$										
$G = 1$		80		100	80		100	80		100	dB
$G = 10$		95		120	100		120	95		120	dB
$G = 100$		110		140	120		140	110		140	dB
$G = 1000$		110		140	120		140	110		140	dB
INPUT CURRENT											
Input Bias Current			0.5	2.0		0.5	1.0		0.5	2	nA
Overtemperature				2.5			1.5			4	nA
Average TC			3.0			3.0			8.0		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current			0.3	1.0		0.3	0.5		0.3	1.0	nA
Overtemperature				1.5			0.75			2.0	nA
Average TC			1.5			1.5			8.0		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
INPUT											
Input Impedance											
Differential			10 2			10 2			10 2		$\text{G}\Omega_{\text{pF}}$
Common-Mode			10 2			10 2			10 2		$\text{G}\Omega_{\text{pF}}$
Input Voltage Range ³	$V_S = \pm 2.3\text{ V to } \pm 5\text{ V}$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	V
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V to } \pm 18\text{ V}$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	V
Overtemperature		$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	V
Overtemperature		$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 2.1$		$+V_S + 2.1$	$-V_S + 2.3$		$+V_S - 1.4$	V

AD620											
Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Common-Mode Rejection											
Ratio DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance	$V_{CM} = 0\text{ V to } \pm 10\text{ V}$										
G = 1		73	90		80	90		73	90		dB
G = 10		93	110		100	110		93	110		dB
G = 100		110	130		120	130		110	130		dB
G = 1000		110	130		120	130		110	130		dB
OUTPUT											
Output Swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 2.3\text{ V}$ to $\pm 5\text{ V}$	$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		V
Overtemperature		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.3$		V
Overtemperature Short Circuit Current		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		V
	$V_S = \pm 5\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$	$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 2.3$	$+V_S - 1.5$		V
			± 18		± 18			± 18			mA
DYNAMIC RESPONSE											
Small Signal -3 dB Bandwidth											
G = 1		1000			1000			1000			kHz
G = 10		800			800			800			kHz
G = 100		120			120			120			kHz
G = 1000		12			12			12			kHz
Slew Rate		0.75	1.2		0.75	1.2		0.75	1.2		V/ μ s
Settling Time to 0.01%											
G = 1-100	10 V Step	15			15			15			μ s
G = 1000		150			150			150			μ s
NOISE											
Voltage Noise, 1 kHz											
$Total\ RTI\ Noise = \sqrt{(e_{ni}^2) + (e_{no}/G)^2}$											
Input, Voltage Noise, e_{ni}		9 13			9 13			9 13			nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Output, Voltage Noise, e_{no}		72 100			72 100			72 100			nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz											
G = 1		3.0			3.0 6.0			3.0 6.0			μ V p-p
G = 10		0.55			0.55 0.8			0.55 0.8			μ V p-p
G = 100-1000		0.28			0.28 0.4			0.28 0.4			μ V p-p
Current Noise											
0.1 Hz to 10 Hz	$f = 1\text{ kHz}$	100			100			100			fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
		10			10			10			pA p-p
REFERENCE INPUT											
R_{IN}	$V_{IN-}, V_{REF} = 0$	20			20			20			kΩ
I_{IN}		50 60			50 60			50 60			μ A
Voltage Range		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		V
Gain to Output		1 ± 0.0001			1 ± 0.0001			1 ± 0.0001			
POWER SUPPLY											
Operating Range ⁴		± 2.3			± 2.3			± 2.3			V
Quiescent Current	$V_S = \pm 2.3\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$	0.9 1.3			0.9 1.3			0.9 1.3			mA
Overtemperature		1.1 1.6			1.1 1.6			1.1 1.6			mA
TEMPERATURE RANGE											
For Specified Performance		-40 to +85			-40 to +85			-55 to +125			$^{\circ}\text{C}$

¹ See Analog Devices military data sheet for 883B tested specifications.

² Does not include effects of external resistor R_S .

³ One input grounded. $G = 1$.

⁴ This is defined as the same supply range that is used to specify PSR.

AD620

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Supply Voltage	±18 V
Internal Power Dissipation ¹	650 mW
Input Voltage (Common-Mode)	±V _S
Differential Input Voltage	25 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range (Q)	−65°C to +150°C
Storage Temperature Range (N, R)	−65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
AD620 (A, B)	−40°C to +85°C
AD620 (S)	−55°C to +125°C
Lead Temperature Range (Soldering 10 seconds)	300°C

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

¹ Specification is for device in free air:
 8-Lead Plastic Package: θ_{JA} = 95°C
 8-Lead CERDIP Package: θ_{JA} = 110°C
 8-Lead SOIC Package: θ_{JA} = 155°C

AD620

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

(@ 25°C, $V_s = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, unless otherwise noted.)

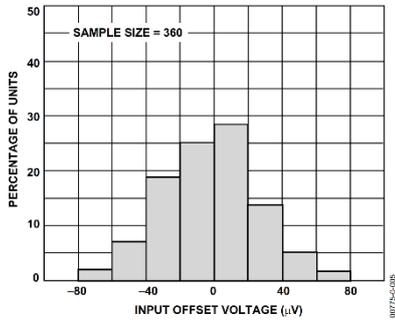


Figure 3. Typical Distribution of Input Offset Voltage

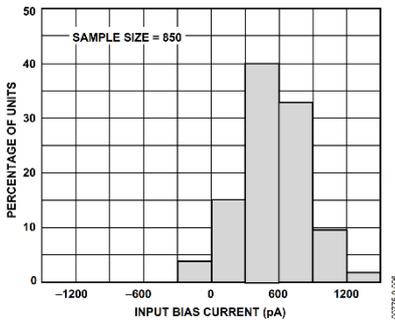


Figure 4. Typical Distribution of Input Bias Current

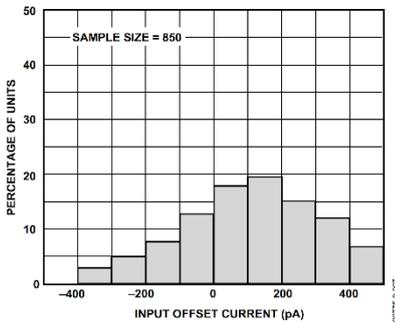


Figure 5. Typical Distribution of Input Offset Current

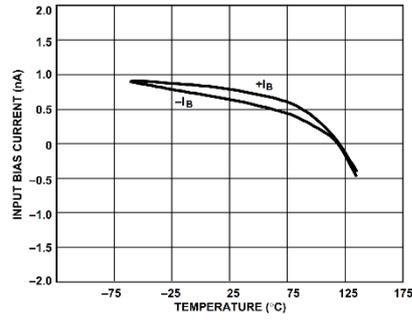


Figure 6. Input Bias Current vs. Temperature

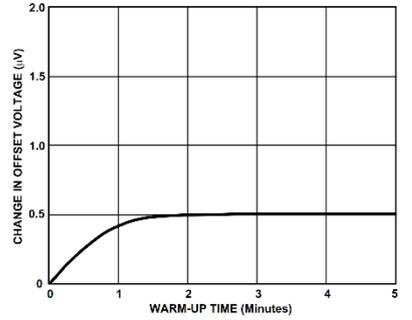


Figure 7. Change in Input Offset Voltage vs. Warm-Up Time

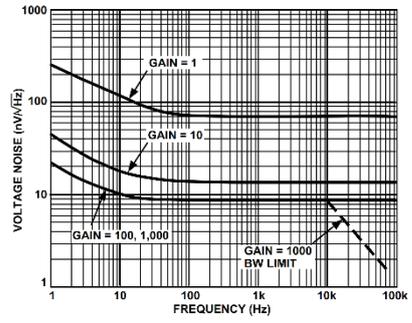


Figure 8. Voltage Noise Spectral Density vs. Frequency ($G = 1-1000$)

AD620

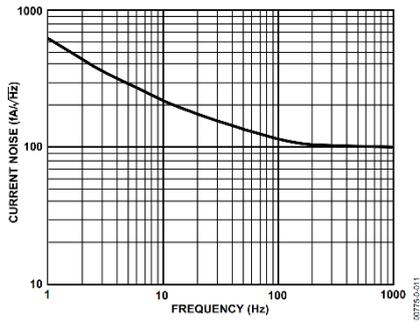


Figure 9. Current Noise Spectral Density vs. Frequency

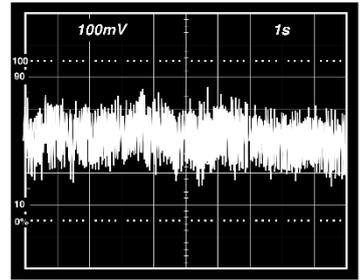


Figure 12. 0.1 Hz to 10 Hz Current Noise, 5 pA/Div

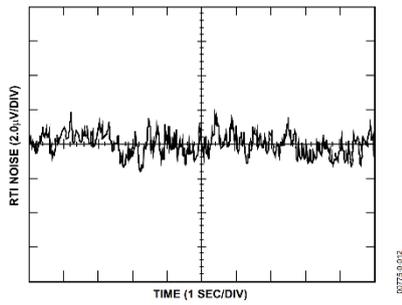


Figure 10. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (G = 1)

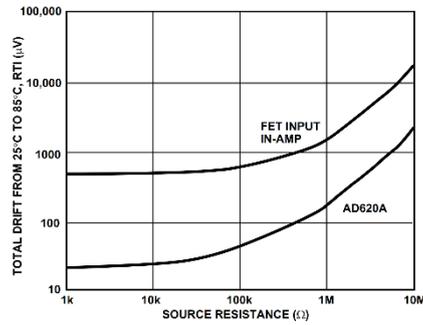


Figure 13. Total Drift vs. Source Resistance

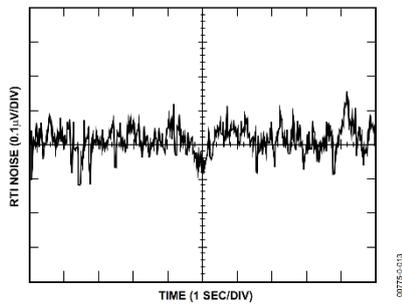


Figure 11. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (G = 1000)

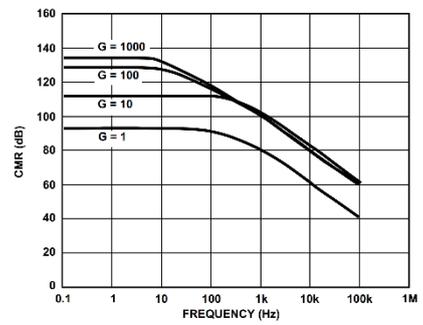


Figure 14. Typical CMR vs. Frequency, RTI, Zero to 1 kΩ Source Imbalance

AD620

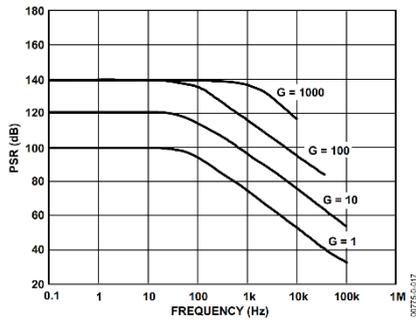


Figure 15. Positive PSR vs. Frequency, RTI ($G = 1-1000$)

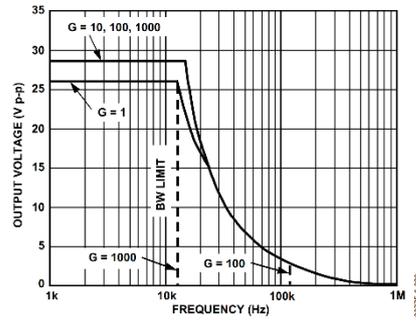


Figure 18. Large Signal Frequency Response

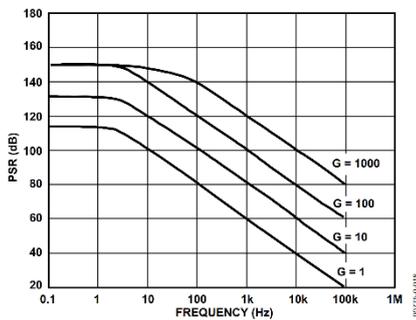


Figure 16. Negative PSR vs. Frequency, RTI ($G = 1-1000$)

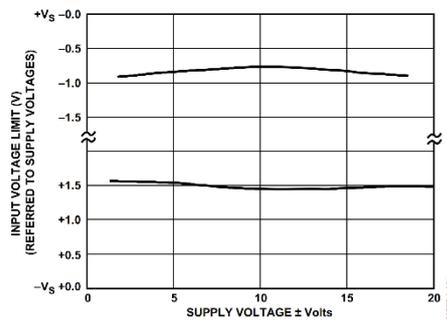


Figure 19. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, $G = 1$

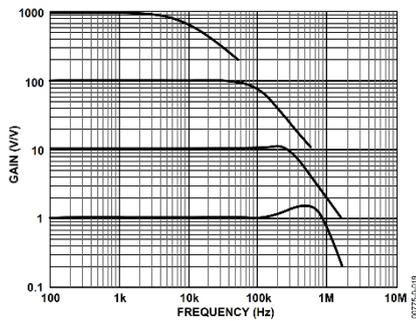


Figure 17. Gain vs. Frequency

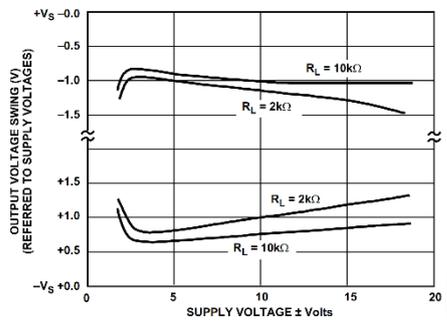


Figure 20. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage, $G = 10$

AD620

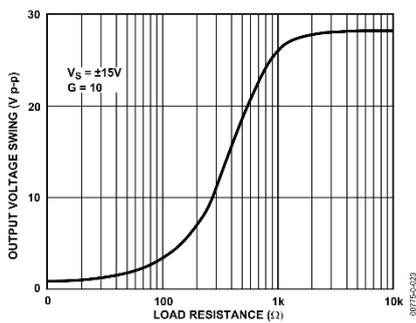


Figure 21. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

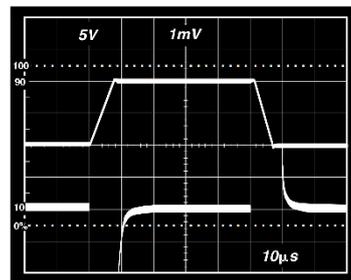


Figure 24. Large Signal Response and Settling Time, G = 10 (0.5 mV = 0.01%)

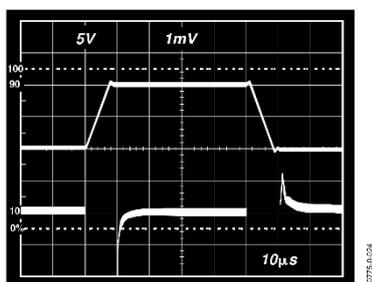


Figure 22. Large Signal Pulse Response and Settling Time G = 1 (0.5 mV = 0.01%)

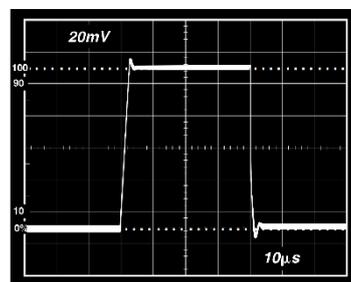


Figure 25. Small Signal Response, G = 10, R_L = 2 kΩ, C_L = 100 pF

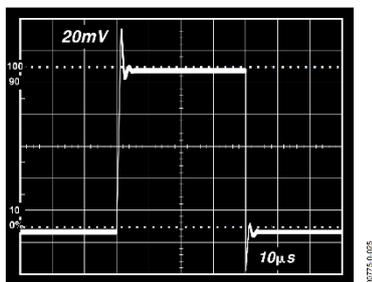


Figure 23. Small Signal Response, G = 1, R_L = 2 kΩ, C_L = 100 pF

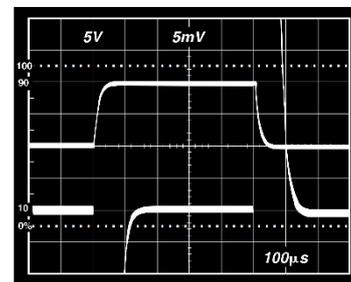


Figure 26. Large Signal Response and Settling Time, G = 100 (0.5 mV = 0.01%)

AD620

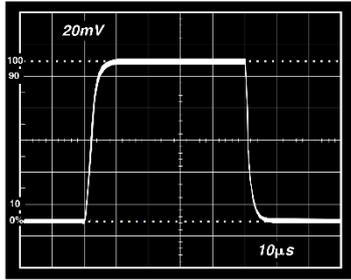


Figure 27. Small Signal Pulse Response, $G = 100$, $R_i = 2\text{ k}\Omega$, $C_i = 100\text{ pF}$

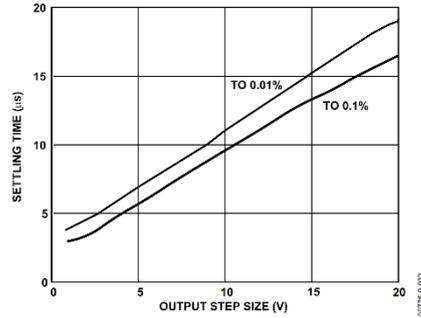


Figure 30. Settling Time vs. Step Size ($G = 1$)

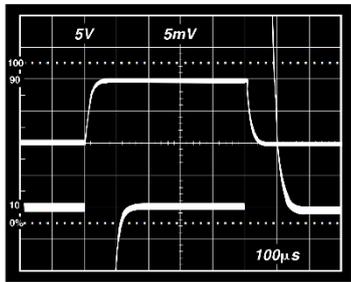


Figure 28. Large Signal Response and Settling Time, $G = 1000$ ($0.5\text{ mV} = 0.01\%$)

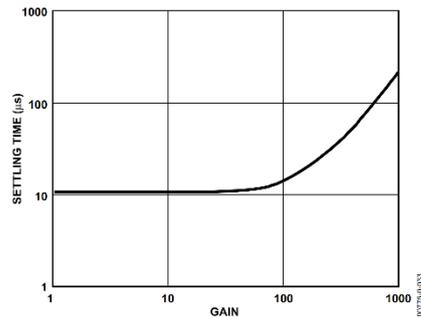


Figure 31. Settling Time to 0.01% vs. Gain, for a 10V Step

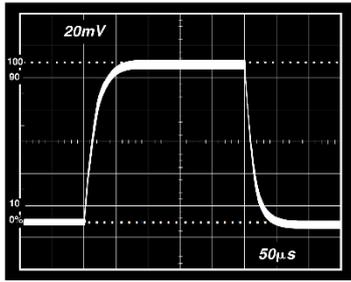


Figure 29. Small Signal Pulse Response, $G = 1000$, $R_i = 2\text{ k}\Omega$, $C_i = 100\text{ pF}$

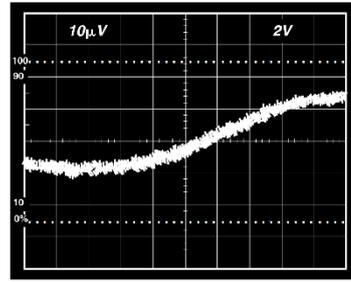


Figure 32. Gain Nonlinearity, $G = 1$, $R_i = 10\text{ k}\Omega$ ($10\text{ }\mu\text{V} = 1\text{ ppm}$)

AD620

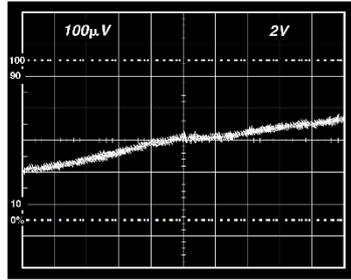


Figure 33. Gain Nonlinearity, $G = 100$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$
($100\text{ }\mu\text{V} = 10\text{ ppm}$)

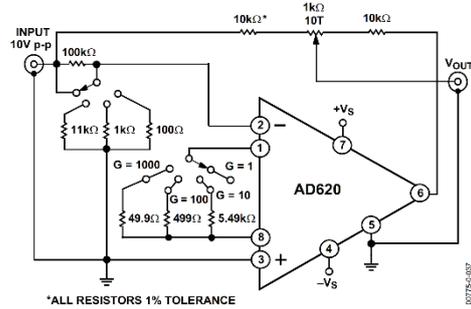


Figure 35. Settling Time Test Circuit

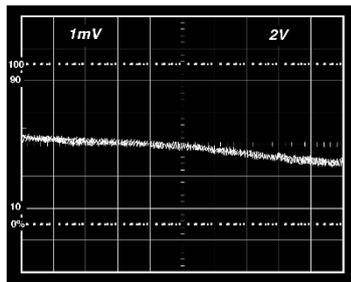


Figure 34. Gain Nonlinearity, $G = 1000$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$
($1\text{ mV} = 100\text{ ppm}$)

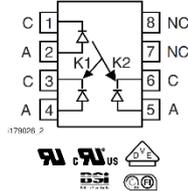
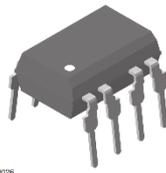


www.vishay.com

IL300

Vishay Semiconductors

Linear Optocoupler, High Gain Stability, Wide Bandwidth



FEATURES

- Couples AC and DC signals
- 0.01 % servo linearity
- Wide bandwidth, > 200 kHz
- High gain stability, ± 0.005 %/°C typically
- Low input-output capacitance
- Low power consumption, < 15 mW
- Isolation test voltage, 5300 V_{RMS}, 1 s
- Internal insulation distance, > 0.4 mm
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



RoHS COMPLIANT

DESCRIPTION

The IL300 linear optocoupler consists of an AlGaAs IRLED irradiating an isolated feedback and an output PIN photodiode in a bifurcated arrangement. The feedback photodiode captures a percentage of the LEDs flux and generates a control signal (I_{P1}) that can be used to servo the LED drive current. This technique compensates for the LED's non-linear, time, and temperature characteristics. The output PIN photodiode produces an output signal (I_{P2}) that is linearly related to the servo optical flux created by the LED.

The time and temperature stability of the input-output coupler gain (K3) is insured by using matched PIN photodiodes that accurately track the output flux of the LED.

APPLICATIONS

- Power supply feedback voltage/current
- Medical sensor isolation
- Audio signal interfacing
- Isolated process control transducers
- Digital telephone isolation

AGENCY APPROVALS

- UL file no. E52744, system code H
- DIN EN 60747-5-5 (VDE 0884-5) available with option 1
- BSI
- FIMKO

ORDERING INFORMATION																			
	I	L	3	0	0	-	D	E	F	G	-	X	0	#	#	T			
	PART NUMBER					K3 BIN					PACKAGE OPTION			TAPE AND REEL					
AGENCY CERTIFIED/PACKAGE	K3 BIN																		
UL, cUL, BSI, FIMKO	0.557 to 1.618	0.765 to 1.181	0.851 to 1.181	0.765 to 0.955	0.851 to 1.061	0.945 to 1.181	0.851 to 0.955	0.945 to 1.061											
DIP-8	IL300	IL300-DEFG	-	-	IL300-EF	-	IL300-E	IL300-F											
DIP-8, 400 mil, option 6	IL300-X006	IL300-DEFG-X006	-	-	IL300-EF-X006	IL300-FG-X006	IL300-E-X006	IL300-F-X006											
SMD-8, option 7	IL300-X007T ⁽¹⁾	IL300-DEFG-X007T ⁽¹⁾	IL300-EFG-X007	IL300-DE-X007T	IL300-EF-X007T ⁽¹⁾	-	IL300-E-X007T	IL300-F-X007											
SMD-8, option 9	IL300-X009T ⁽¹⁾	IL300-DEFG-X009T ⁽¹⁾	-	-	IL300-EF-X009T ⁽¹⁾	-	-	IL300-F-X009T ⁽¹⁾											
VDE, UL, BSI, FIMKO	0.557 to 1.618	0.765 to 1.181	0.851 to 1.181	0.765 to 0.955	0.851 to 1.061	0.945 to 1.181	0.851 to 0.955	0.945 to 1.061											
DIP-8	IL300-X001	IL300-DEFG-X001	-	-	IL300-EF-X001	-	IL300-E-X001	IL300-F-X001											
DIP-8, 400 mil, option 6	IL300-X016	IL300-DEFG-X016	-	-	IL300-EF-X016	-	-	IL300-F-X016											
SMD-8, option 7	IL300-X017	IL300-DEFG-X017T ⁽¹⁾	-	-	IL300-EF-X017T ⁽¹⁾	-	IL300-E-X017T	IL300-F-X017T ⁽¹⁾											
SMD-8, option 9	-	-	-	-	-	-	-	IL300-F-X019T ⁽¹⁾											

Note
⁽¹⁾ Also available in tubes, do not put "T" on the end.

For technical questions, contact: optocoupleranswers@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000



www.vishay.com

IL300

Vishay Semiconductors

OPERATION DESCRIPTION

A typical application circuit (figure 1) uses an operational amplifier at the circuit input to drive the LED. The feedback photodiode sources current to R1 connected to the inverting input of U1. The photocurrent, I_{p1} , will be of a magnitude to satisfy the relationship of ($I_{p1} = V_{IN}/R1$).

The magnitude of this current is directly proportional to the feedback transfer gain (K1) times the LED drive current ($V_{IN}/R1 = K1 \times I_F$). The op-amp will supply LED current to force sufficient photocurrent to keep the node voltage (V_b) equal to V_a .

The output photodiode is connected to a non-inverting voltage follower amplifier. The photodiode load resistor, R2, performs the current to voltage conversion. The output amplifier voltage is the product of the output forward gain (K2) times the LED current and photodiode load, R2 ($V_O = I_F \times K2 \times R2$).

Therefore, the overall transfer gain (V_O/V_{IN}) becomes the ratio of the product of the output forward gain (K2) times the photodiode load resistor (R2) to the product of the feedback transfer gain (K1) times the input resistor (R1). This reduces to

$$V_O/V_{IN} = (K2 \times R2)/(K1 \times R1).$$

The overall transfer gain is completely independent of the LED forward current. The IL300 transfer gain (K3) is expressed as the ratio of the output gain (K2) to the feedback gain (K1). This shows that the circuit gain becomes the product of the IL300 transfer gain times the ratio of the output to input resistors

$$V_O/V_{IN} = K3 (R2/R1).$$

K1-SERVO GAIN

The ratio of the input photodiode current (I_{p1}) to the LED current (I_F) i.e., $K1 = I_{p1}/I_F$.

K2-FORWARD GAIN

The ratio of the output photodiode current (I_{p2}) to the LED current (I_F), i.e., $K2 = I_{p2}/I_F$.

K3-TRANSFER GAIN

The transfer gain is the ratio of the forward gain to the servo gain, i.e., $K3 = K2/K1$.

Δ K3-TRANSFER GAIN LINEARITY

The percent deviation of the transfer gain, as a function of LED or temperature from a specific transfer gain at a fixed LED current and temperature.

PHOTODIODE

A silicon diode operating as a current source. The output current is proportional to the incident optical flux supplied by the LED emitter. The diode is operated in the photovoltaic or photoconductive mode. In the photovoltaic mode the diode functions as a current source in parallel with a forward biased silicon diode.

The magnitude of the output current and voltage is dependent upon the load resistor and the incident LED optical flux. When operated in the photoconductive mode the diode is connected to a bias supply which reverse biases the silicon diode. The magnitude of the output current is directly proportional to the LED incident optical flux.

LED (LIGHT EMITTING DIODE)

An infrared emitter constructed of AlGaAs that emits at 890 nm operates efficiently with drive current from 500 μ A to 40 mA. Best linearity can be obtained at drive currents between 5 mA to 20 mA. Its output flux typically changes by -0.5 %/°C over the above operational current range.

APPLICATION CIRCUIT

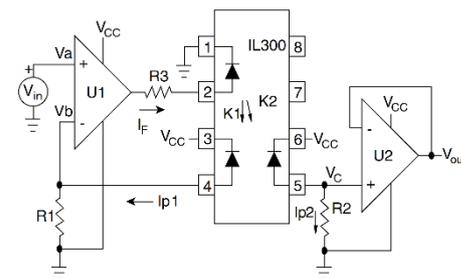


Fig. 1 - Typical Application Circuit



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T _{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Power dissipation		P _{diss}	160	mW
Derate linearly from 25 °C			2.13	mW/°C
Forward current		I _F	60	mA
Surge current (pulse width < 10 μs)		I _{PK}	250	mA
Reverse voltage		V _R	5	V
Thermal resistance		R _{th}	470	K/W
Junction temperature		T _j	100	°C
OUTPUT				
Power dissipation		P _{diss}	50	mW
Derate linearly from 25 °C			0.65	mW/°C
Reverse voltage		V _R	50	V
Thermal resistance		R _{th}	1500	K/W
Junction temperature		T _j	100	°C
COUPLER				
Total package dissipation at 25 °C		P _{tot}	210	mW
Derate linearly from 25 °C			2.8	mW/°C
Storage temperature		T _{stg}	-55 to +150	°C
Operating temperature		T _{amb}	-55 to +100	°C
Isolation test voltage		V _{ISO}	> 5300	V _{RMS}
Isolation resistance	V _{IO} = 500 V, T _{amb} = 25 °C	R _{IO}	> 10 ¹²	Ω
	V _{IO} = 500 V, T _{amb} = 100 °C	R _{IO}	> 10 ¹¹	Ω

Note

- Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of the time can adversely affect reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T _{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT (LED EMITTER)						
Forward voltage	I _F = 10 mA	V _F		1.25	1.50	V
V _F temperature coefficient		ΔV _F /Δ°C		-2.2		mV/°C
Reverse current	V _R = 5 V	I _R		1		μA
Junction capacitance	V _F = 0 V, f = 1 MHz	C _j		15		pF
Dynamic resistance	I _F = 10 mA	ΔV _F /ΔI _F		6		Ω
OUTPUT						
Dark current	V _{det} = -15 V, I _F = 0 A	I _D		1	25	nA
Open circuit voltage	I _F = 10 mA	V _D		500		mV
Short circuit current	I _F = 10 mA	I _{SC}		70		μA
Junction capacitance	V _F = 0 V, f = 1 MHz	C _j		12		pF
Noise equivalent power	V _{det} = 15 V	NEP		4 x 10 ⁻¹⁴		W/√Hz
COUPLER						
Input-output capacitance	V _F = 0 V, f = 1 MHz			1		pF
K1, servo gain (I _{P1} /I _F)	I _F = 10 mA, V _{det} = -15 V	K1	0.0050	0.007	0.011	
Servo current (I _{P1}) ⁽¹⁾⁽²⁾	I _F = 10 mA, V _{det} = -15 V	I _{P1}		70		μA
K2, forward gain (I _{P2} /I _F)	I _F = 10 mA, V _{det} = -15 V	K2	0.0036	0.007	0.011	
Forward current	I _F = 10 mA, V _{det} = -15 V	I _{P2}		70		μA
K3, transfer gain (K2/K1) ⁽¹⁾⁽²⁾	I _F = 10 mA, V _{det} = -15 V	K3	0.56	1	1.65	K2/K1


www.vishay.com

IL300

Vishay Semiconductors

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
COUPLER						
Transfer gain stability	$I_F = 10\text{ mA}$, $V_{det} = -15\text{ V}$	$\Delta K3/\Delta T_A$		± 0.005	± 0.15	$\%/^{\circ}\text{C}$
Transfer gain linearity	$I_F = 1\text{ mA}$ to 10 mA	$\Delta K3$		± 0.25		%
	$I_F = 1\text{ mA}$ to 10 mA , $T_{amb} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $75\text{ }^{\circ}\text{C}$			± 0.5		%
PHOTOCONDUCTIVE OPERATION						
Frequency response	$I_{Fq} = 10\text{ mA}$, $MOD = \pm 4\text{ mA}$, $R_L = 50\text{ }\Omega$	BW (-3 db)		200		kHz
Phase response at 200 kHz	$V_{det} = -15\text{ V}$			-45		Deg.

Notes

- Minimum and maximum values were tested requirements. Typical values are characteristics of the device and are the result of engineering evaluation. Typical values are for information only and are not part of the testing requirements.
- (1) Bin sorting:
K3 (transfer gain) is sorted into bins that are $\pm 6\%$, as follows:
Bin A = 0.557 to 0.626
Bin B = 0.620 to 0.696
Bin C = 0.690 to 0.773
Bin D = 0.765 to 0.859
Bin E = 0.851 to 0.955
Bin F = 0.945 to 1.061
Bin G = 1.051 to 1.181
Bin H = 1.169 to 1.311
Bin I = 1.297 to 1.456
Bin J = 1.442 to 1.618
K3 = K2/K1. K3 is tested at $I_F = 10\text{ mA}$, $V_{det} = -15\text{ V}$.
- (2) Bin categories: All IL300s are sorted into a K3 bin, indicated by an alpha character that is marked on the part. The bins range from "A" through "J".
The IL300 is shipped in tubes of 50 each. Each tube contains only one category of K3. The category of the parts in the tube is marked on the tube label as well as on each individual part.
- (3) Category options: standard IL300 orders will be shipped from the categories that are available at the time of the order. Any of the ten categories may be shipped. For customers requiring a narrower selection of bins, the bins can be grouped together as follows:
IL300-DEFG: order this part number to receive categories D, E, F, G only.
IL300-EF: order this part number to receive categories E, F only.
IL300-E: order this part number to receive category E only.

SWITCHING CHARACTERISTICS						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Switching time	$\Delta I_F = 2\text{ mA}$, $I_{Fq} = 10\text{ mA}$	t_r		1		μs
		t_f		1		μs
Rise time		t_r		1.75		μs
Fall time		t_f		1.75		μs

COMMON MODE TRANSIENT IMMUNITY						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Common mode capacitance	$V_F = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{CM}		0.5		pF
Common mode rejection ratio	$f = 60\text{ Hz}$, $R_L = 2.2\text{ k}\Omega$	CMRR		130		dB



www.vishay.com

IL300

Vishay Semiconductors

TYPICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)

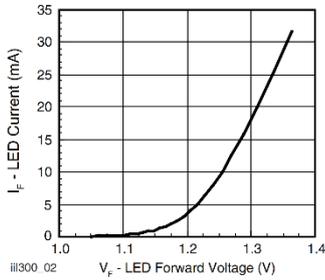


Fig. 2 - LED Forward Current vs. Forward Voltage

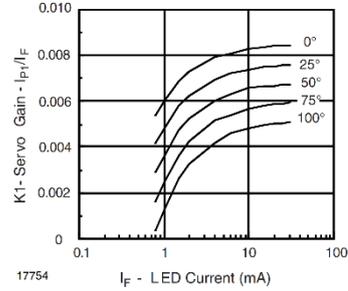


Fig. 5 - Servo Gain vs. LED Current and Temperature

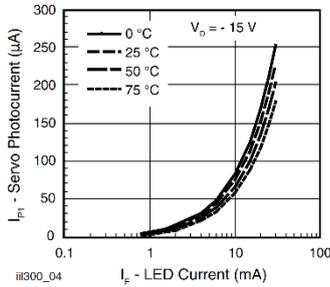


Fig. 3 - Servo Photocurrent vs. LED Current and Temperature

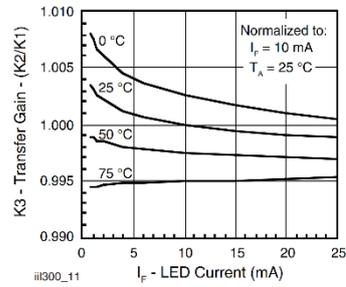


Fig. 6 - Normalized Transfer Gain vs. LED Current and Temperature

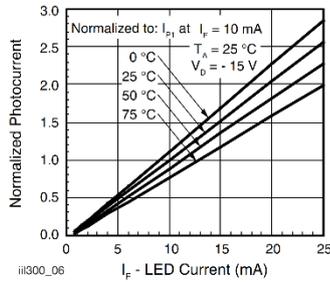


Fig. 4 - Normalized Servo Photocurrent vs. LED Current and Temperature

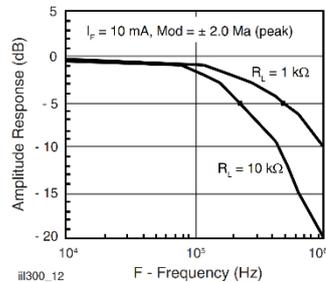


Fig. 7 - Amplitude Response vs. Frequency



LM833-N

www.ti.com

SNOSBD8E –MAY 2004–REVISED MAY 2012

LM833-N Dual Audio Operational Amplifier

Check for Samples: [LM833-N](#)

FEATURES

- **Wide Dynamic Range:** >140dB
- **Low Input Noise Voltage:** $4.5nV/\sqrt{Hz}$
- **High Slew Rate:** 7 V/ μs (typ); 5V/ μs (Min)
- **High Gain Bandwidth:** 15MHz (typ); 10MHz (Min)
- **Wide Power Bandwidth:** 120KHz
- **Low Distortion:** 0.002%
- **Low Offset Voltage:** 0.3mV
- **Large Phase Margin:** 60°
- **Available in 8 Pin VSSOP Package**

DESCRIPTION

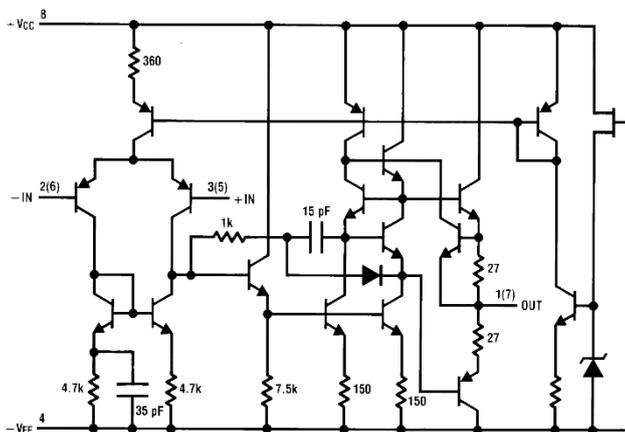
The LM833-N is a dual general purpose operational amplifier designed with particular emphasis on performance in audio systems.

This dual amplifier IC utilizes new circuit and processing techniques to deliver low noise, high speed and wide bandwidth without increasing external components or decreasing stability. The LM833-N is internally compensated for all closed loop gains and is therefore optimized for all preamp and high level stages in PCM and HiFi systems.

The LM833-N is pin-for-pin compatible with industry standard dual operational amplifiers.

Schematic Diagram

(1/2 LM833-N)



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet. All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2004–2012, Texas Instruments Incorporated

LM833-N



SNOSBD8E – MAY 2004 – REVISED MAY 2012

www.ti.com

Connection Diagram

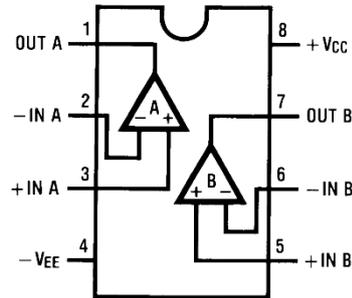


Figure 1. See Package Number D0008A, P0008E or DGK0008A



These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾⁽²⁾

Supply Voltage $V_{CC}-V_{EE}$		36V	
Differential Input Voltage ⁽³⁾ V_I		$\pm 30V$	
Input Voltage Range ⁽³⁾ V_{IC}		$\pm 15V$	
Power Dissipation ⁽⁴⁾ P_D		500 mW	
Operating Temperature Range T_{OPR}		$-40 \sim 85^\circ C$	
Storage Temperature Range T_{STG}		$-60 \sim 150^\circ C$	
Soldering Information	PDIP Package	Soldering (10 seconds)	260°C
	Small Outline Package (SOIC and VSSOP)	Vapor Phase (60 seconds)	215°C
		Infrared (15 seconds)	220°C
ESD tolerance ⁽⁵⁾		1600V	

- (1) *Absolute Maximum Ratings* indicate limits beyond which damage to the device may occur. *Operating Ratings* indicate conditions for which the device is functional, but do not ensure specific performance limits. *Electrical Characteristics* state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which ensure specific performance limits. This assumes that the device is within the Operating Ratings. Specifications are not ensured for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/ Distributors for availability and specifications.
- (3) If supply voltage is less than $\pm 15V$, it is equal to supply voltage.
- (4) This is the permissible value at $T_A \leq 85^\circ C$.
- (5) Human body model, 1.5 k Ω in series with 100 pF.



LM833-N

www.ti.com

SNOSBD8E –MAY 2004–REVISED MAY 2012

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS⁽¹⁾⁽²⁾(T_A = 25°C, V_S = ±15V)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
V _{OS}	Input Offset Voltage	R _S = 10Ω		0.3	5	mV
I _{OS}	Input Offset Current			10	200	nA
I _B	Input Bias Current			500	1000	nA
A _V	Voltage Gain	R _L = 2 kΩ, V _O = ±10V	90	110		dB
V _{OM}	Output Voltage Swing	R _L = 10 kΩ	±12	±13.5		V
		R _L = 2 kΩ	±12	±13.4		V
V _{CM}	Input Common-Mode Range		±12	±14.0		V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	V _{IN} = ±12V	80	100		dB
PSRR	Power Supply Rejection Ratio	V _S = 15 ~ 5V, -15 ~ -5V	80	100		dB
I _O	Supply Current	V _O = 0V, Both Amps		5	8	mA

- (1) *Absolute Maximum Ratings* indicate limits beyond which damage to the device may occur. *Operating Ratings* indicate conditions for which the device is functional, but do not ensure specific performance limits. *Electrical Characteristics* state DC and AC electrical specifications under particular test conditions which ensure specific performance limits. This assumes that the device is within the *Operating Ratings*. Specifications are not ensured for parameters where no limit is given, however, the typical value is a good indication of device performance.
- (2) All voltages are measured with respect to the ground pin, unless otherwise specified.

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS(T_A = 25°C, V_S = ±15V, R_L = 2 kΩ)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
SR	Slew Rate	R _L = 2 kΩ	5	7		V/μs
GBW	Gain Bandwidth Product	f = 100 kHz	10	15		MHz
V _{NI}	Equivalent Input Noise Voltage (LM833AM, LM833AMX)	RIAA, R _S = 2.2 kΩ ⁽¹⁾			1.4	μV

- (1) RIAA Noise Voltage Measurement Circuit

DESIGN ELECTRICAL CHARACTERISTICS(T_A = 25°C, V_S = ±15V)

The following parameters are not tested or ensured.

Symbol	Parameter	Conditions	Typ	Units
ΔV _{OS} /ΔT	Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage		2	μV/°C
THD	Distortion	R _L = 2 kΩ, f = 20~20 kHz V _{OUT} = 3 V _{rms} , A _V = 1	0.002	%
e _n	Input Referred Noise Voltage	R _S = 100Ω, f = 1 kHz	4.5	nV / √Hz
i _n	Input Referred Noise Current	f = 1 kHz	0.7	pA / √Hz
PBW	Power Bandwidth	V _O = 27 V _{pp} , R _L = 2 kΩ, THD ≤ 1%	120	kHz
f _U	Unity Gain Frequency	Open Loop	9	MHz
Φ _M	Phase Margin	Open Loop	60	deg
	Input Referred Cross Talk	f = 20~20 kHz	-120	dB

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

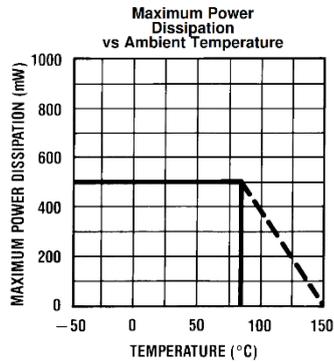


Figure 2.

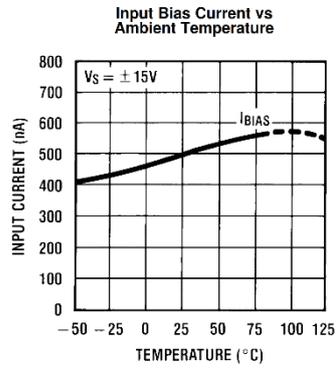


Figure 3.

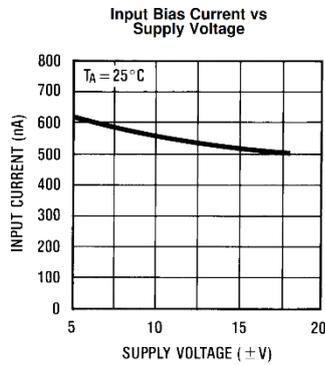


Figure 4.

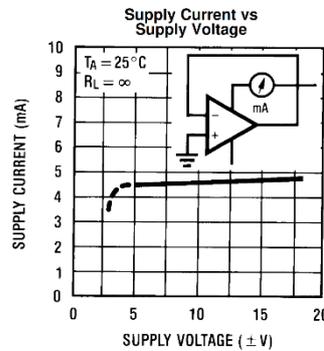


Figure 5.

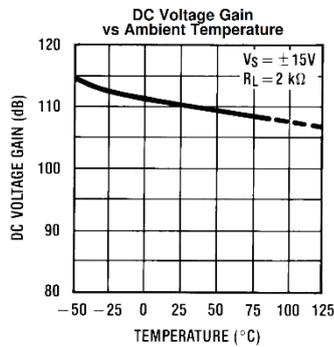


Figure 6.

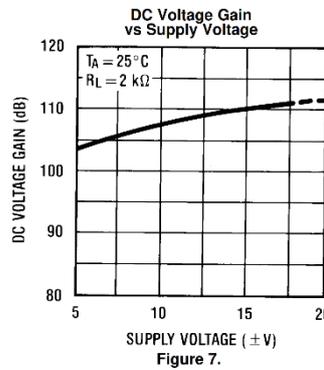


Figure 7.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

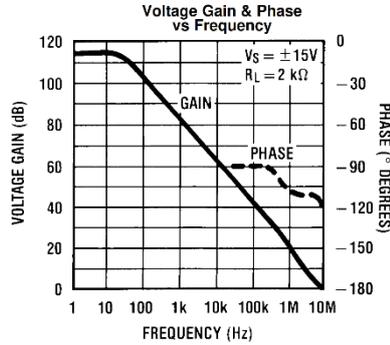


Figure 8.

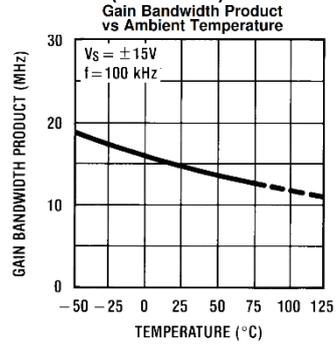


Figure 9.

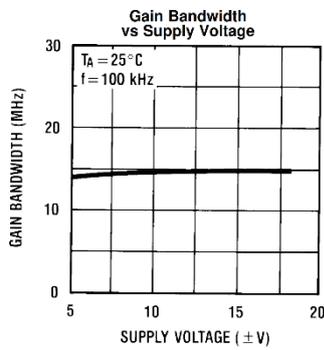


Figure 10.

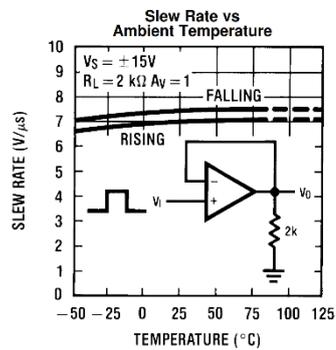


Figure 11.

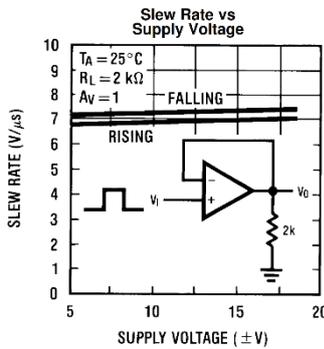


Figure 12.

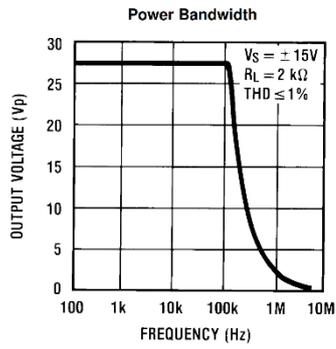


Figure 13.



LM833-N



SNOSBD8E – MAY 2004 – REVISED MAY 2012

www.ti.com

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

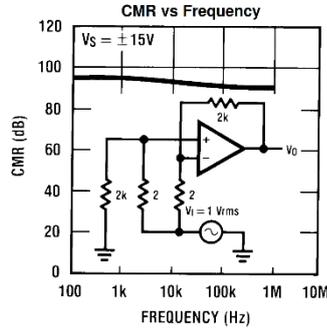


Figure 14.

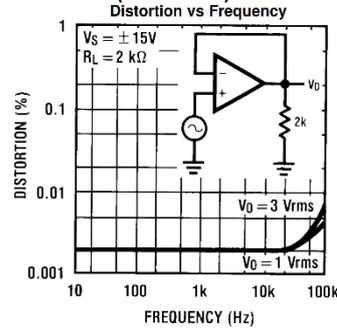


Figure 15.

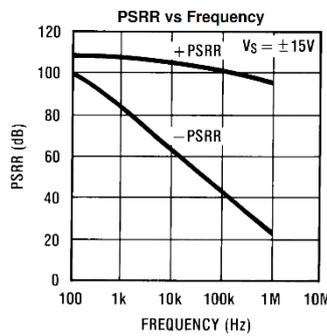


Figure 16.

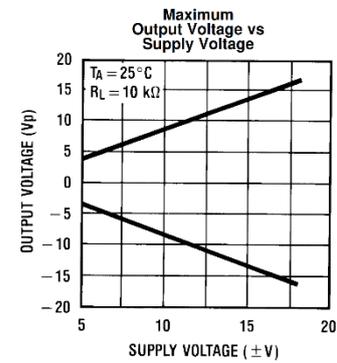


Figure 17.

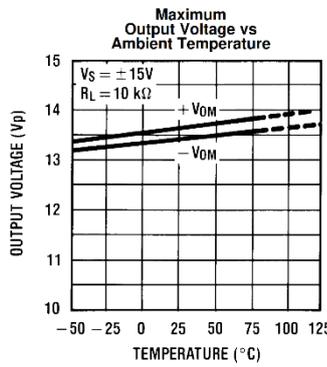


Figure 18.

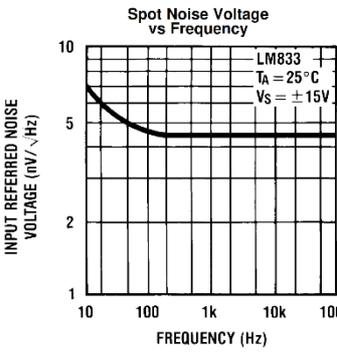


Figure 19.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS (continued)

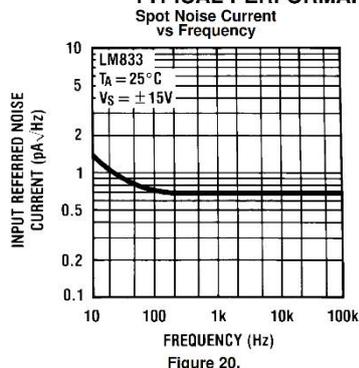


Figure 20.

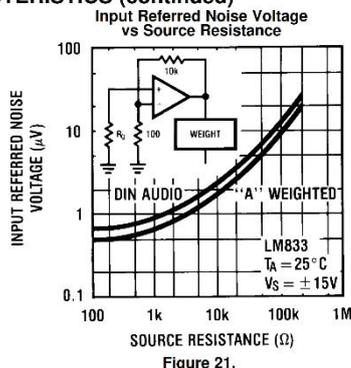


Figure 21.

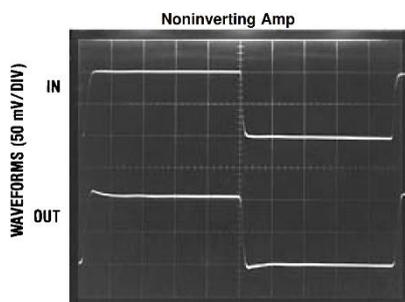


Figure 22.

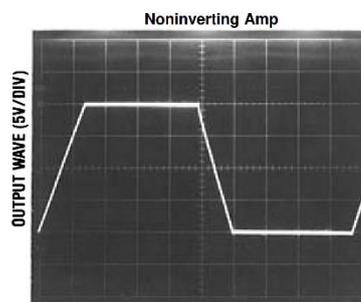


Figure 23.

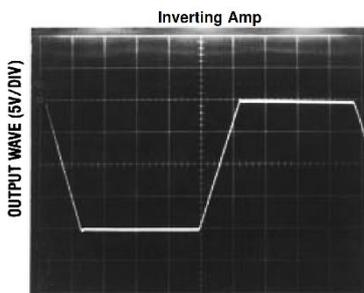


Figure 24.

NE5532, SA5532, SE5532, NE5532A, SE5532A

Internally Compensated Dual Low Noise Operational Amplifier

The 5532 is a dual high-performance low noise operational amplifier. Compared to most of the standard operational amplifiers, such as the 1458, it shows better noise performance, improved output drive capability and considerably higher small-signal and power bandwidths.

This makes the device especially suitable for application in high-quality and professional audio equipment, instrumentation and control circuits, and telephone channel amplifiers. The op amp is internally compensated for gains equal to one. If very low noise is of prime importance, it is recommended that the 5532A version be used because it has guaranteed noise voltage specifications.

Features

- Small-Signal Bandwidth: 10 MHz
- Output Drive Capability: 600 Ω , 10 V_{RMS}
- Input Noise Voltage: 5.0 nV/√Hz (Typical)
- DC Voltage Gain: 50000
- AC Voltage Gain: 2200 at 10 kHz
- Power Bandwidth: 140 kHz
- Slew Rate: 9.0 V/μs
- Large Supply Voltage Range: ± 3.0 to ± 20 V
- Compensated for Unity Gain
- Pb-Free Packages are Available

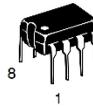


ON Semiconductor®

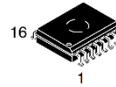
<http://onsemi.com>



SOIC-8
D SUFFIX
CASE 751



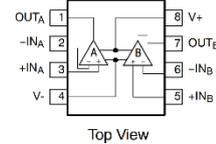
PDIP-8
N SUFFIX
CASE 626



SOIC-16 WB
D SUFFIX
CASE 751G

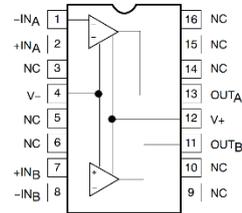
PIN CONNECTIONS

N, D8 Packages



Top View

D Package*



Top View

*SOL and non-standard pinout.

DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 6 of this data sheet.

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 7 of this data sheet.

NE5532, SA5532, SE5532, NE5532A, SE5532A

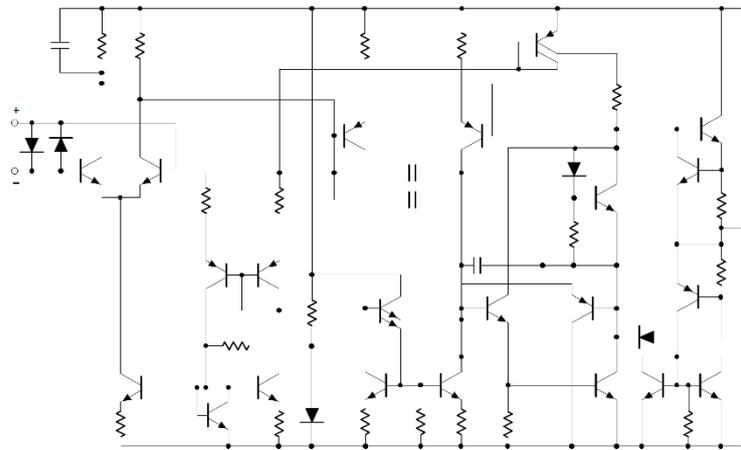


Figure 1. Equivalent Schematic (Each Amplifier)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V_S	± 22	V
Input Voltage	V_{IN}	$\pm V_{SUPPLY}$	V
Differential Input Voltage (Note 1)	V_{DIFF}	± 0.5	V
Operating Temperature Range NE5532/A SA5532 SE5532/A	T_{amb}	0 to 70 -40 to +85 -55 to +125	$^{\circ}C$
Storage Temperature	T_{stg}	-65 to +150	$^{\circ}C$
Junction Temperature	T_J	150	$^{\circ}C$
Maximum Power Dissipation, $T_{amb} = 25^{\circ}C$ (Still-Air) 8 D8 Package 8 N Package 16 D Package	P_D	780 1200 1200	mW
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient 8 D8 Package 8 N Package 16 D Package	$R_{\theta JA}$	182 130 140	$^{\circ}C/W$
Lead Soldering Temperature (10 sec max)	T_{slid}	230	$^{\circ}C$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

1. Diodes protect the inputs against overvoltage. Therefore, unless current-limiting resistors are used, large currents will flow if the differential input voltage exceeds 0.6 V. Maximum current should be limited to ± 10 mA.

NE5532, SA5532, SE5532, NE5532A, SE5532A

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$; $V_S = \pm 15\text{ V}$, unless otherwise noted.) (Notes 2, 3 and 4)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	SE5532/A			NE5532/A, SA5532			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Offset Voltage	V_{OS}	-	-	0.5	2.0	-	0.5	4.0	mV
	-	Overtemperature	-	-	3.0	-	-	5.0	mV
	$\Delta V_{OS}/\Delta T$	-	-	5.0	-	-	5.0	-	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Offset Current	I_{OS}	-	-	-	100	-	10	150	nA
	-	Overtemperature	-	-	200	-	-	200	nA
	$\Delta I_{OS}/\Delta T$	-	-	200	-	-	200	-	$\text{pA}/^{\circ}\text{C}$
Input Current	I_B	-	-	300	500	-	300	800	nA
	-	Overtemperature	-	-	700	-	-	1000	nA
	$\Delta I_B/\Delta T$	-	-	5.0	-	-	5.0	-	$\text{nA}/^{\circ}\text{C}$
Supply Current	I_{CC}	-	-	8.0	10.5	-	8.0	16	mA
	-	Overtemperature	-	-	13	-	-	-	-
Common-Mode Input Range	V_{CM}	-	± 12	± 13	-	± 12	± 13	-	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	-	80	100	-	70	100	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	-	-	10	50	-	10	100	$\mu\text{V}/\text{V}$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VOL}	$R_L \geq 2.0\text{ k}\Omega$; $V_O = \pm 10\text{ V}$	50	100	-	25	100	-	V/mV
		Overtemperature	25	-	-	15	-	-	-
		$R_L \geq 600\ \Omega$; $V_O = \pm 10\text{ V}$	40	50	-	15	50	-	-
		Overtemperature	20	-	-	10	-	-	-
Output Swing	V_{OUT}	$R_L \geq 600\ \Omega$	± 12	± 13	-	± 12	± 13	-	V
		Overtemperature	± 10	± 12	-	± 10	± 12	-	-
		$R_L \geq 600\ \Omega$; $V_S = \pm 18\text{ V}$	± 15	± 16	-	± 15	± 16	-	-
		Overtemperature	± 12	± 14	-	± 12	± 14	-	-
		$R_L \geq 2.0\text{ k}\Omega$	± 13	± 13.5	-	± 13	± 13.5	-	-
		Overtemperature	± 12	± 12.5	-	± 10	± 12.5	-	-
Input Resistance	R_{IN}	-	30	300	-	30	300	-	$\text{k}\Omega$
Output Short Circuit Current	I_{SC}	-	10	38	60	10	38	60	mA

2. Diodes protect the inputs against overvoltage. Therefore, unless current-limiting resistors are used, large currents will flow if the differential input voltage exceeds 0.6 V. Maximum current should be limited to $\pm 10\text{ mA}$.

3. For operation at elevated temperature, derate packages based on the package thermal resistance.

4. Output may be shorted to ground at $V_S = \pm 15\text{ V}$, $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure dissipation rating is not exceeded.

NE5532, SA5532, SE5532, NE5532A, SE5532A

AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$; $V_S = \pm 15\text{ V}$, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	NE/SE5532/A, SA5532			Unit
			Min	Typ	Max	
Output Resistance	R_{OUT}	$A_V = 30\text{ dB}$ Closed-loop $f = 10\text{ kHz}$, $R_L = 600\ \Omega$	-	0.3	-	Ω
Overshoot	-	Voltage-Follower $V_{IN} = 100\text{ mV}_{p,p}$ $C_L = 100\text{ pF}$; $R_L = 600\ \Omega$	-	10	-	%
Gain	A_V	$f = 10\text{ kHz}$	-	2.2	-	V/mV
Gain Bandwidth Product	GBW	$C_L = 100\text{ pF}$; $R_L = 600\ \Omega$	-	10	-	MHz
Slew Rate	SR	-	-	9.0	-	V/ μs
Power Bandwidth	-	$V_{OUT} = \pm 10\text{ V}$	-	140	-	kHz
		$V_{OUT} = \pm 14\text{ V}$; $R_L = 600\ \Omega$ $V_{CC} = \pm 18\text{ V}$	-	100	-	

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$; $V_S = \pm 15\text{ V}$, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	NE/SE5532			NE/SA/SE5532A			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Noise Voltage	V_{NOISE}	$f_0 = 30\text{ Hz}$	-	8.0	-	-	8.0	12	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_0 = 1.0\text{ kHz}$	-	5.0	-	-	5.0	6.0	
Input Noise Current	I_{NOISE}	$f_0 = 30\text{ Hz}$	-	2.7	-	-	2.7	-	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_0 = 1.0\text{ kHz}$	-	0.7	-	-	0.7	-	
Channel Separation	-	$f = 1.0\text{ kHz}$; $R_S = 5.0\text{ k}\Omega$	-	110	-	-	110	-	dB

NE5532, SA5532, SE5532, NE5532A, SE5532A

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

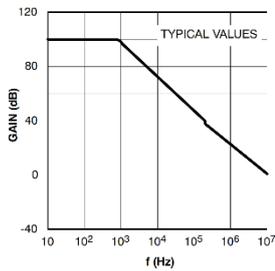


Figure 2. Open-Loop Frequency Response

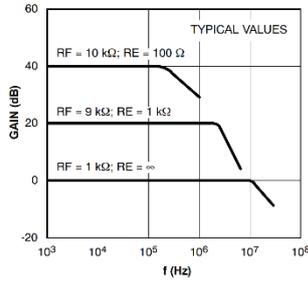


Figure 3. Closed-Loop Frequency Response

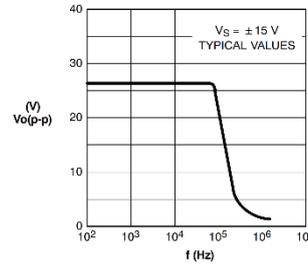


Figure 4. Large-Signal Frequency Response

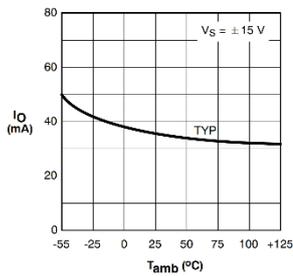


Figure 5. Output Short-Circuit Current

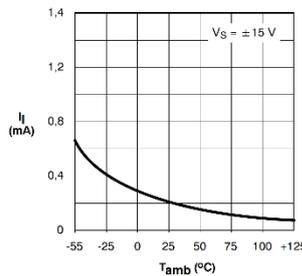


Figure 6. Input Bias Current

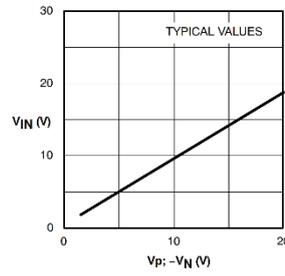


Figure 7. Input Common-Mode Voltage Range

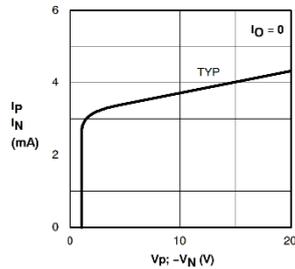


Figure 8. Supply Current

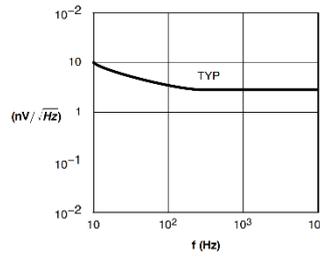


Figure 9. Input Noise Voltage Density



Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier

Data Sheet

OP07

FEATURES

- Low V_{OS} : 75 μV maximum
- Low V_{OS} drift: 1.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum
- Ultrastable vs. time: 1.5 μV per month maximum
- Low noise: 0.6 μV p-p maximum
- Wide input voltage range: $\pm 14\text{ V}$ typical
- Wide supply voltage range: $\pm 3\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$
- 125 $^\circ\text{C}$ temperature-tested dice

APPLICATIONS

- Wireless base station control circuits
- Optical network control circuits
- Instrumentation
- Sensors and controls
 - Thermocouples
 - Resistor thermal detectors (RTDs)
 - Strain bridges
 - Shunt current measurements
- Precision filters

GENERAL DESCRIPTION

The OP07 has very low input offset voltage (75 μV maximum for OP07E) that is obtained by trimming at the wafer stage. These low offset voltages generally eliminate any need for external nulling. The OP07 also features low input bias current ($\pm 4\text{ nA}$ for the OP07E) and high open-loop gain (200 V/mV for the OP07E). The low offset and high open-loop gain make the OP07 particularly useful for high gain instrumentation applications.

PIN CONFIGURATION

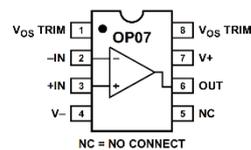
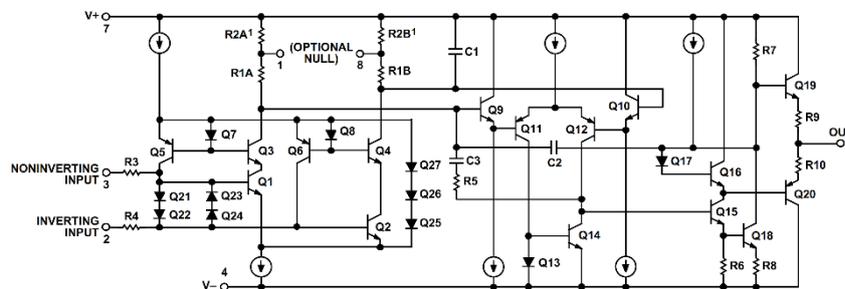


Figure 1.

The wide input voltage range of $\pm 13\text{ V}$ minimum combined with a high CMRR of 106 dB (OP07E) and high input impedance provide high accuracy in the noninverting circuit configuration. Excellent linearity and gain accuracy can be maintained even at high closed-loop gains. Stability of offsets and gain with time or variations in temperature is excellent. The accuracy and stability of the OP07, even at high gain, combined with the freedom from external nulling have made the OP07 an industry standard for instrumentation applications.

The OP07 is available in two standard performance grades. The OP07E is specified for operation over the 0°C to 70°C range, and the OP07C is specified over the -40°C to $+85^\circ\text{C}$ temperature range.

The OP07 is available in epoxy 8-lead PDIP and 8-lead narrow SOIC packages. For CERDIP and TO-99 packages and standard microcircuit drawing (SMD) versions, see the OP77.



¹R2A and R2B ARE ELECTRONICALLY ADJUSTED ON CHIP AT FACTORY FOR MINIMUM INPUT OFFSET VOLTAGE.

Figure 2. Simplified Schematic

Rev. G

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©2002-2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

SPECIFICATIONS

OP07E ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_S = \pm 15$ V, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
INPUT CHARACTERISTICS						
$T_A = 25^\circ\text{C}$						
Input Offset Voltage ¹	V_{OS}			30	75	μV
Long-Term V_{OS} Stability ²	V_{OS}/Time			0.3	1.5	$\mu\text{V}/\text{Month}$
Input Offset Current	I_{OS}			0.5	3.8	nA
Input Bias Current	I_B			± 1.2	± 4.0	nA
Input Noise Voltage	e_n p-p	0.1 Hz to 10 Hz ³		0.35	0.6	μV p-p
Input Noise Voltage Density	e_n	$f_o = 10$ Hz		10.3	18.0	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_o = 100$ Hz ³		10.0	13.0	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_o = 1$ kHz		9.6	11.0	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Input Noise Current	I_n p-p			14	30	pA p-p
Input Noise Current Density	I_n	$f_o = 10$ Hz		0.32	0.80	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_o = 100$ Hz ³		0.14	0.23	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
		$f_o = 1$ kHz		0.12	0.17	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Input Resistance, Differential Mode ⁴	R_{IN}		15	50		M Ω
Input Resistance, Common Mode	R_{INCM}			160		G Ω
Input Voltage Range	IVR		± 13	± 14		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13$ V	106	123		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3$ V to ± 18 V		5	20	$\mu\text{V}/\text{V}$
Large Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2$ k Ω , $V_O = \pm 10$ V	200	500		V/mV
		$R_L \geq 500$ Ω , $V_O = \pm 0.5$ V, $V_S = \pm 3$ V ⁴	150	400		V/mV
$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$						
Input Offset Voltage ¹	V_{OS}			45	130	μV
Voltage Drift Without External Trim ⁴	TCV_{OS}			0.3	1.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Voltage Drift with External Trim ³	TCV_{OSN}	$R_F = 20$ k Ω		0.3	1.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current	I_{OS}			0.9	5.3	nA
Input Offset Current Drift	TCI_{OS}			8	35	pA/ $^\circ\text{C}$
Input Bias Current	I_B			± 1.5	± 5.5	nA
Input Bias Current Drift	TCI_B			13	35	pA/ $^\circ\text{C}$
Input Voltage Range	IVR		± 13	± 13.5		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13$ V	103	123		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3$ V to ± 18 V		7	32	$\mu\text{V}/\text{V}$
Large Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2$ k Ω , $V_O = \pm 10$ V	180	450		V/mV
OUTPUT CHARACTERISTICS						
$T_A = 25^\circ\text{C}$						
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 10$ k Ω	± 12.5	± 13.0		V
		$R_L \geq 2$ k Ω	± 12.0	± 12.8		V
		$R_L \geq 1$ k Ω	± 10.5	± 12.0		V
$0^\circ\text{C} \leq T_A \leq 70^\circ\text{C}$						
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2$ k Ω	± 12	± 12.6		V

OP07 Data Sheet

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
DYNAMIC PERFORMANCE						
T_A = 25°C						
Slew Rate	SR	R _L ≥ 2 kΩ ³	0.1	0.3		V/μs
Closed-Loop Bandwidth	BW	A _{VOL} = 1 ⁵	0.4	0.6		MHz
Open-Loop Output Resistance	R _O	V _O = 0, I _O = 0		60		Ω
Power Consumption	P _d	V _S = ±15 V, No load		75	120	mW
		V _S = ±3 V, No load		4	6	mW
Offset Adjustment Range		R _P = 20 kΩ		±4		mV

¹ Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power.

² Long-term input offset voltage stability refers to the averaged trend time of V_{OS} vs. the time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically 2.5 μV. Refer to the Typical Performance Characteristics section. Parameter is sample tested.

³ Sample tested.

⁴ Guaranteed by design.

⁵ Guaranteed but not tested.

OP07C ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_S = ±15 V, unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
INPUT CHARACTERISTICS						
T_A = 25°C						
Input Offset Voltage ¹	V _{OS}			60	150	μV
Long-Term V _{OS} Stability ²	V _{OS} /Time			0.4	2.0	μV/Month
Input Offset Current	I _{OS}			0.8	6.0	nA
Input Bias Current	I _B			±1.8	±7.0	nA
Input Noise Voltage	e _n p-p	0.1 Hz to 10 Hz ³		0.38	0.65	μV p-p
Input Noise Voltage Density	e _n	f _o = 10 Hz		10.5	20.0	nV/√Hz
		f _o = 100 Hz ³		10.2	13.5	nV/√Hz
		f _o = 1 kHz		9.8	11.5	nV/√Hz
Input Noise Current	I _n p-p			15	35	pA p-p
Input Noise Current Density	I _n	f _o = 10 Hz		0.35	0.90	pA/√Hz
		f _o = 100 Hz ³		0.15	0.27	pA/√Hz
		f _o = 1 kHz		0.13	0.18	pA/√Hz
Input Resistance, Differential Mode ⁴	R _{IN}		8	33		MΩ
Input Resistance, Common Mode	R _{INCM}			120		GΩ
Input Voltage Range	IVR		±13	±14		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V _{CM} = ±13 V	100	120		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _S = ±3 V to ±18 V		7	32	μV/V
Large Signal Voltage Gain	A _{VO}	R _L ≥ 2 kΩ, V _O = ±10 V	120	400		V/mV
		R _L ≥ 500 Ω, V _O = ±0.5 V, V _S = ±3 V ⁴	100	400		V/mV
-40°C ≤ T_A ≤ +85°C						
Input Offset Voltage ¹	V _{OS}			85	250	μV
Voltage Drift Without External Trim ⁴	TCV _{OS}			0.5	1.8	μV/°C
Voltage Drift with External Trim ³	TCV _{OSN}	R _P = 20 kΩ		0.4	1.6	μV/°C
Input Offset Current	I _{OS}			1.6	8.0	nA
Input Offset Current Drift	TCI _{OS}			12	50	pA/°C
Input Bias Current	I _B			±2.2	±9.0	nA
Input Bias Current Drift	TCI _B			18	50	pA/°C
Input Voltage Range	IVR		±13	±13.5		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V _{CM} = ±13 V	97	120		dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _S = ±3 V to ±18 V		10	51	μV/V
Large Signal Voltage Gain	A _{VO}	R _L ≥ 2 kΩ, V _O = ±10 V	100	400		V/mV

Data Sheet	OP07
-------------------	-------------

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
OUTPUT CHARACTERISTICS						
T_A = 25°C						
Output Voltage Swing	V _O	R _L ≥ 10 kΩ	±12.0	±13.0		V
		R _L ≥ 2 kΩ	±11.5	±12.8		V
		R _L ≥ 1 kΩ		±12.0		V
-40°C ≤ T_A ≤ +85°C						
Output Voltage Swing	V _O	R _L ≥ 2 kΩ	±12	±12.6		V
DYNAMIC PERFORMANCE						
T_A = 25°C						
Slew Rate	SR	R _L ≥ 2 kΩ ²	0.1	0.3		V/μs
Closed-Loop Bandwidth	BW	A _{VOL} = 1 ⁵	0.4	0.6		MHz
Open-Loop Output Resistance	R _O	V _O = 0, I _O = 0		60		Ω
Power Consumption	P _d	V _S = ±15 V, No load		80	150	mW
		V _S = ±3 V, No load		4	8	mW
Offset Adjustment Range		R _F = 20 kΩ		±4		mV

¹ Input offset voltage measurements are performed by automated test equipment approximately 0.5 seconds after application of power.

² Long-term input offset voltage stability refers to the averaged trend time of V_{OS} vs. the time over extended periods after the first 30 days of operation. Excluding the initial hour of operation, changes in V_{OS} during the first 30 operating days are typically 2.5 μV. Refer to the Typical Performance Characteristics section. Parameter is sample tested.

³ Sample tested.

⁴ Guaranteed by design.

⁵ Guaranteed but not tested.

OP07

Data Sheet

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Ratings
Supply Voltage (V _s)	±22 V
Input Voltage ¹	±22 V
Differential Input Voltage	±30 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range S and P Packages	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
OP07E	0°C to 70°C
OP07C	-40°C to +85°C
Junction Temperature	150°C
Lead Temperature, Soldering (60 sec)	300°C

¹For supply voltages less than ±22 V, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

THERMAL RESISTANCE

θ_{JA} is specified for the worst-case conditions, that is, a device soldered in a circuit board for surface-mount packages.

Table 4. Thermal Resistance

Package Type	θ_{JA}	θ_{JC}	Unit
8-Lead PDIP (P-Suffix)	103	43	°C/W
8-Lead SOIC_N (S-Suffix)	158	43	°C/W

ESD CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although this product features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

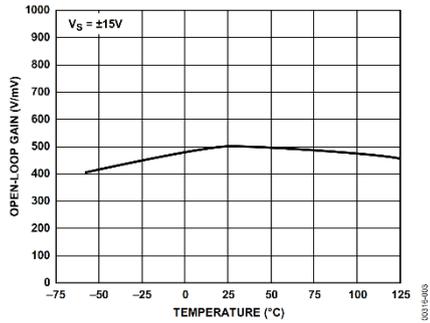


Figure 3. Open-Loop Gain vs. Temperature

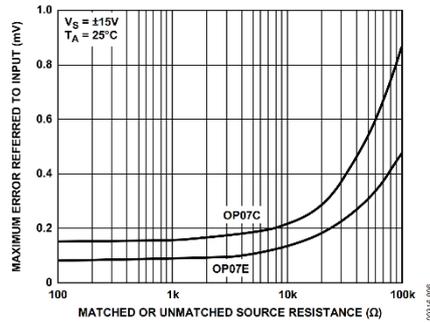


Figure 6. Maximum Error vs. Source Resistance

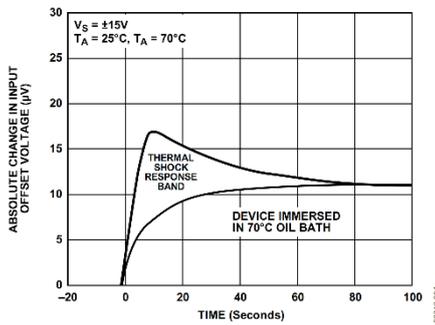


Figure 4. Offset Voltage Change due to Thermal Shock

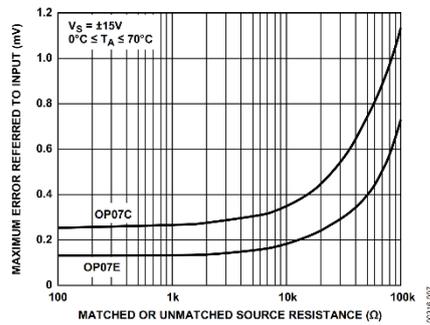


Figure 7. Maximum Error vs. Source Resistance

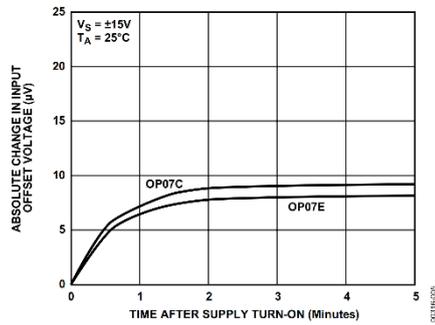


Figure 5. Warm-Up Drift

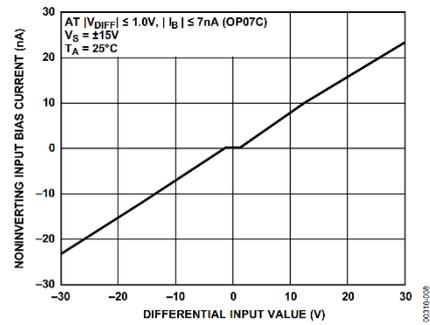


Figure 8. Input Bias Current vs. Differential Input Voltage

OP07

Data Sheet

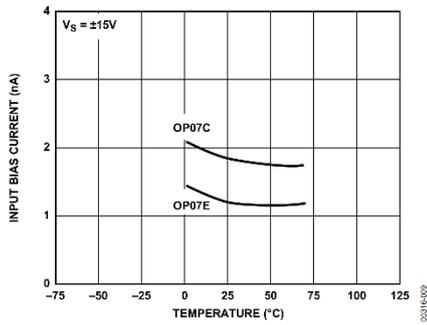


Figure 9. Input Bias Current vs. Temperature

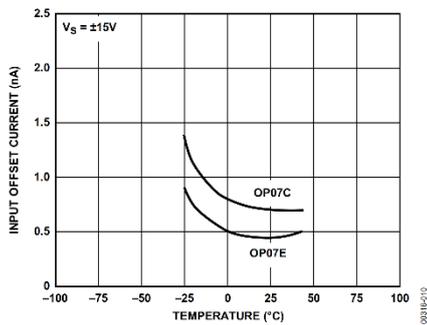


Figure 10. Input Offset Current vs. Temperature

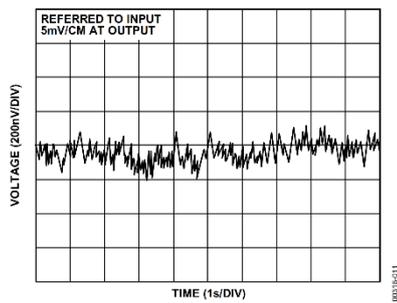


Figure 11. Low Frequency Noise

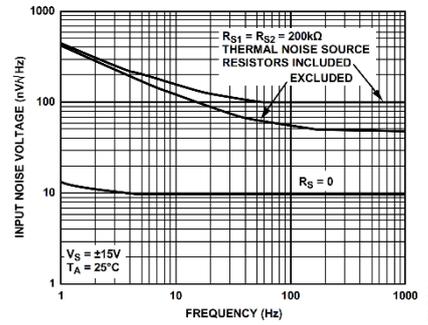


Figure 12. Total Input Noise Voltage vs. Frequency

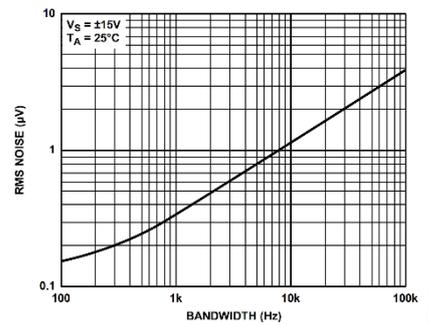


Figure 13. Input Wideband Noise vs. Bandwidth, 0.1 Hz to Frequency Indicated

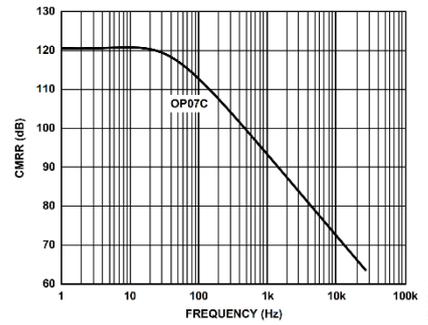


Figure 14. CMRR vs. Frequency

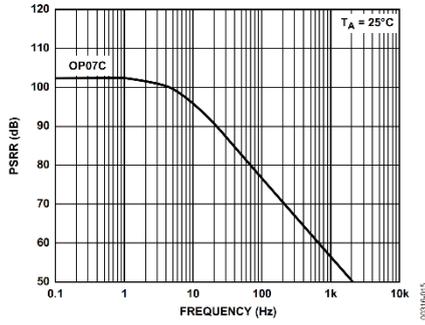


Figure 15. PSRR vs. Frequency

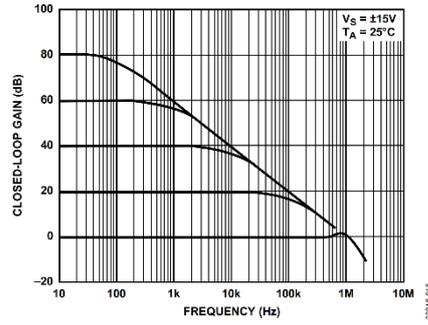


Figure 18. Closed-Loop Frequency Response for Various Gain Configurations

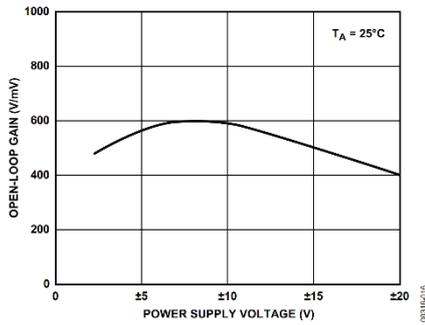


Figure 16. Open-Loop Gain vs. Power Supply Voltage

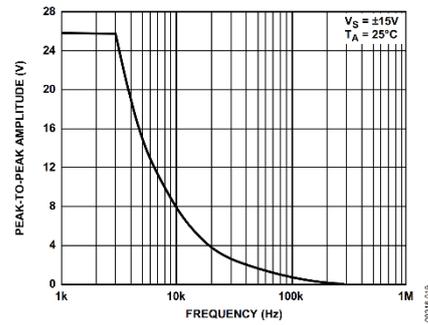


Figure 19. Maximum Output Swing vs. Frequency

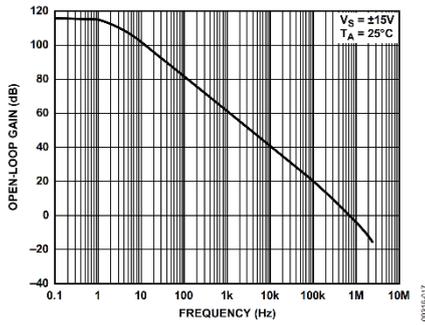


Figure 17. Open-Loop Frequency Response

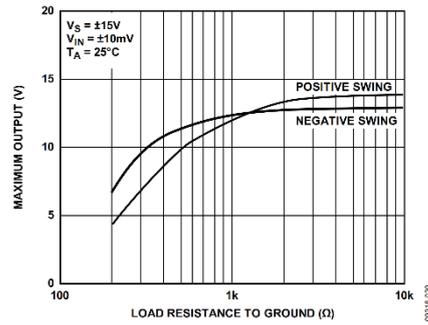


Figure 20. Maximum Output Voltage vs. Load Resistance

OP07

Data Sheet

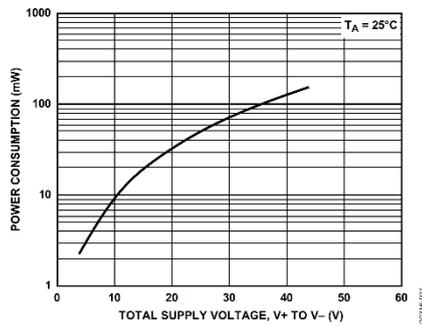


Figure 21. Power Consumption vs. Power Supply

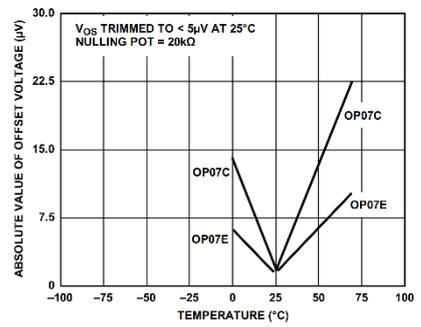


Figure 24. Trimmed Offset Voltage vs. Temperature

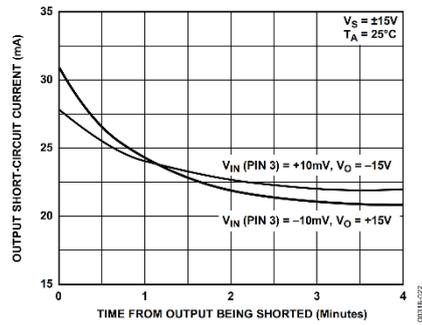


Figure 22. Output Short-Circuit Current vs. Time

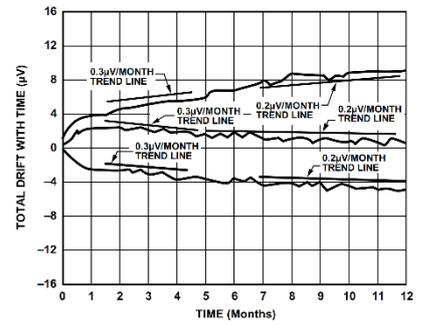


Figure 25. Offset Voltage Drift vs. Time

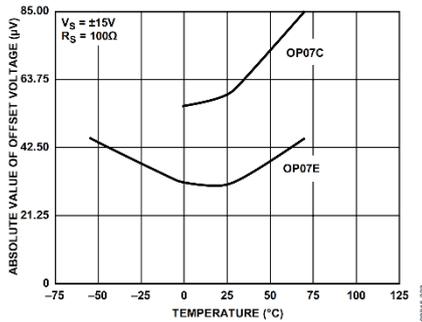


Figure 23. Untrimmed Offset Voltage vs. Temperature

