

ภาคผนวก ก.

ตารางที่ ก-1 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.2

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=1	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	113.619	113.9888	113.9989	114.0022	114.0039	114.0049
0.1	113.6185	113.9887	113.9989	114.0022	114.0039	114.0049
1	113.6178	113.9888	113.9988	114.0023	114.0039	114.0049
10	113.6017	113.9887	113.9988	114.0022	114.0039	114.0049
100	112.2336	113.9819	113.9963	114.0007	114.0028	114.004
1000	97.75891	113.347	113.7527	113.8499	113.8906	113.9123
10000	77.87191	101.7033	105.6529	107.4041	108.388	109.0142
100000	57.87025	81.96272	86.33077	88.46312	89.76344	90.64814

ตารางที่ ก-2 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.3

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	110.7074	86.39145	66.06559	46.11067	32.46573	26.84883
0.1	110.7074	86.39147	66.06559	46.11067	32.46573	26.84883
1	110.7071	86.39149	66.0656	46.11067	32.46573	26.84883
10	110.699	86.39142	66.06559	46.11067	32.46573	26.84883
100	109.9443	86.38837	66.06557	46.11067	32.46573	26.84883
1000	97.6522	86.09287	66.0627	46.11063	32.46572	26.84883
10000	77.87033	77.29738	65.78529	46.10747	32.46554	26.84877
100000	57.86977	57.85945	57.2169	45.80168	32.44729	26.84251

ตารางที่ ก-3 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.4

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=3	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	115.5636	132.4639	138.2733	141.7224	144.1836	146.0985
0.1	115.5636	132.4639	138.2733	141.7224	144.1836	146.0985
1	115.5636	132.4639	138.2734	141.7224	144.1836	146.0985
10	115.5636	132.4639	138.2734	141.7224	144.1836	146.0985
100	115.5636	132.4639	138.2733	141.7222	144.1833	146.098
1000	115.5635	132.4614	138.2643	141.7029	144.1498	146.0463
10000	115.5544	132.2198	137.4549	140.1112	141.6721	142.657
100000	114.735	124.1896	124.9448	125.1479	125.2365	125.285

ตารางที่ ก-4 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.5

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=3	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
0.1	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
1	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
10	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
100	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1035
1000	115.5638	132.4648	138.2746	141.7237	144.1846	146.0987
10000	115.5635	132.4442	138.1958	141.5506	143.8835	145.639
100000	115.5273	130.76	133.7258	134.6415	135.0194	135.2071

ตารางที่ ก-5 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.6

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	115.5637	115.5641	115.5667	115.5926	115.7072	115.8483
0.1	115.5637	115.564	115.5666	115.5926	115.7072	115.8482
1	115.5638	115.564	115.5667	115.5926	115.7072	115.8483
10	115.5638	115.564	115.5666	115.5926	115.7072	115.8483
100	115.5638	115.564	115.5666	115.5926	115.7072	115.8483
1000	115.5637	115.564	115.5666	115.5926	115.707	115.848
10000	115.5593	115.5595	115.562	115.5865	115.6923	115.8169
100000	115.1416	115.1407	115.1312	115.0287	114.4344	113.4987

ตารางที่ ก-6 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.7

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
0.1	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
1	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
10	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
100	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
1000	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
10000	115.5635	115.5638	115.5664	115.5924	115.7073	115.8488
100000	115.5273	115.5276	115.5302	115.556	115.6698	115.81

ตารางที่ ก-7 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.8

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	112.5644	95.23743	75.56134	55.64574	41.89615	36.15146
0.1	112.5646	95.23745	75.56134	55.64574	41.89615	36.15146
1	112.5644	95.23748	75.56134	55.64574	41.89615	36.15146
10	112.5629	95.23738	75.56133	55.64574	41.89615	36.15146
100	112.4253	95.23481	75.56131	55.64574	41.89615	36.15146
1000	106.2782	94.98366	75.55849	55.64567	41.8961	36.15141
10000	87.42512	86.77228	75.28512	55.63849	41.89154	36.14691
100000	67.04499	67.03989	66.438	54.95858	41.46184	35.72369

ตารางที่ ก-8 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.9

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	112.5645	95.23749	75.56141	55.64582	41.89622	36.15153
0.1	112.5646	95.23751	75.56141	55.64582	41.89622	36.15153
1	112.5645	95.2375	75.56141	55.64582	41.89622	36.15153
10	112.5631	95.23748	75.56141	55.64582	41.89622	36.15153
100	112.4255	95.23489	75.56138	55.64582	41.89622	36.15153
1000	106.2798	94.98398	75.55862	55.64579	41.89622	36.15153
10000	87.43098	86.77917	75.29041	55.64281	41.89578	36.15116
100000	67.4102	67.40628	66.81711	55.35304	41.85218	36.11403

ตารางที่ ก-9 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.10

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	112.6789	95.35202	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
0.1	112.6788	95.35204	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
1	112.679	95.35205	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
10	112.6775	95.35203	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
100	112.5397	95.34945	75.67595	55.76021	42.00989	36.26434
1000	106.3875	95.0979	75.67312	55.76014	42.00985	36.2643
10000	87.53262	86.88065	75.39912	55.75282	42.00516	36.25968
100000	67.14258	67.13738	66.53529	55.06057	41.56401	35.82511

ตารางที่ ก-10 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.11

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	112.6789	95.35202	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
0.1	112.6788	95.35204	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
1	112.679	95.35205	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
10	112.6775	95.35203	75.67598	55.76022	42.00989	36.26434
100	112.5397	95.34945	75.67595	55.76021	42.00989	36.26434
1000	106.3875	95.0979	75.67312	55.76014	42.00985	36.2643
10000	87.53262	86.88065	75.39912	55.75282	42.00516	36.25968
100000	67.14258	67.13738	66.53529	55.06057	41.56401	35.82511

ตารางที่ ก-11 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.12

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=3	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	112.5356	129.4359	135.2453	138.6941	141.1554	143.0703
0.1	112.5357	129.4359	135.2452	138.6942	141.1554	143.0706
1	112.5354	129.4359	135.2451	138.6944	141.1554	143.0705
10	112.534	129.4344	135.2438	138.6927	141.154	143.0688
100	112.3965	129.2967	135.1059	138.5548	141.0158	142.9305
1000	106.2507	123.1472	128.9482	132.3855	134.8313	136.7271
10000	87.398	104.0967	109.3391	112.0357	113.6353	114.6533
100000	67.02034	76.71721	77.07814	77.29189	77.38505	77.436

ตารางที่ ก-12 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.13

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=3	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	112.5353	129.4365	135.247	138.6969	141.1591	143.0747
0.1	112.5355	129.4367	135.247	138.6969	141.159	143.0747
1	112.5354	129.4368	135.2471	138.6969	141.1591	143.075
10	112.5342	129.4352	135.2455	138.6956	141.1577	143.0735
100	112.3966	129.2977	135.108	138.5579	141.02	142.9357
1000	106.2509	123.1509	128.9596	132.4077	134.8675	136.7807
10000	87.40208	104.2841	110.0416	113.4068	115.754	117.527
100000	67.38153	82.79235	85.94764	86.95658	87.37994	87.59206

ตารางที่ ก-13 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.14

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=2	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	109.5432	129.9682	135.7875	139.245	141.7141	143.6366
0.1	109.5432	129.9683	135.7875	139.245	141.7141	143.6366
1	109.5432	129.9683	135.7875	139.245	141.7141	143.6365
10	109.5432	129.9683	135.7875	139.245	141.714	143.6365
100	109.5426	129.965	135.7838	139.2408	141.7093	143.6309
1000	109.4802	129.6453	135.432	138.8442	141.2529	143.0998
10000	104.7958	118.4962	124.1249	127.6637	130.1513	131.7365
100000	72.03189	75.94738	89.71562	100.256	109.8856	122.8078

ตารางที่ ก-14 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.15

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=3	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
0.1	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
1	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
10	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1036
100	115.5638	132.465	138.2754	141.7255	144.1877	146.1035
1000	115.5638	132.4648	138.2746	141.7237	144.1846	146.0987
10000	115.5635	132.4442	138.1958	141.5506	143.8835	145.639
100000	115.5273	130.76	133.7258	134.6415	135.0194	135.2071

ตารางที่ ก-15 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.16

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	109.5422	109.5333	109.4447	108.6068	105.6611	103.0439
0.1	109.5422	109.5333	109.4447	108.6068	105.661	103.0438
1	109.5422	109.5333	109.4447	108.6067	105.6595	103.0406
10	109.5422	109.5333	109.4445	108.5946	105.5108	102.7289
100	109.5416	109.5326	109.4294	107.5258	99.10986	93.73894
1000	109.4794	109.4585	108.1349	93.9435	80.18354	74.2753
10000	104.8016	104.4084	93.79981	74.09184	60.19497	54.28033
100000	72.03486	72.03676	70.09996	54.00844	40.14882	34.24244

ตารางที่ ก-16 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.17

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
0.1	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
1	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
10	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
100	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
1000	115.5639	115.5641	115.5667	115.5928	115.7077	115.8492
10000	115.5635	115.5638	115.5664	115.5924	115.7073	115.8488
100000	115.5273	115.5276	115.5302	115.556	115.6698	115.81

ตารางที่ ก-17 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.18

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R1%	R10%
0.01	115.3835	102.9391	84.24165	64.44504	50.75054	45.06026
0.1	115.3836	102.9391	84.24165	64.44504	50.75054	45.06026
1	115.382	102.939	84.24164	64.44504	50.75054	45.06026
10	115.2394	102.9308	84.24155	64.44504	50.75054	45.06026
100	108.9712	102.1843	84.23202	64.44506	50.75054	45.06025
1000	90.08401	89.93255	83.37071	64.44742	50.75035	45.0587
10000	70.03982	70.09606	70.52751	64.68097	50.72702	44.90151
100000	44.79259	44.83058	45.21137	48.18001	36.83278	30.19165

ตารางที่ ก-18 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.19

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	105.634	89.08127	69.52022	49.61674	35.86841	30.12407
0.1	105.634	89.08127	69.52022	49.61674	35.86841	30.12407
0.125893	105.6337	89.08125	69.52022	49.61674	35.86841	30.12407
1	105.6339	89.08126	69.52022	49.61674	35.86841	30.12407
10	105.6319	89.08122	69.52022	49.61674	35.86841	30.12407
100	105.4383	89.07684	69.52017	49.61674	35.86841	30.12407
1000	98.14667	88.66036	69.51539	49.61669	35.8684	30.12407
10000	78.99008	78.59783	69.06209	49.61218	35.86809	30.12384
100000	58.96675	58.96797	58.65309	49.1796	35.83695	30.1012

ตารางที่ ก-19 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.20

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	106.9283	100.1443	83.99855	64.55898	50.89673	45.20967
0.1	106.9282	100.1443	83.99855	64.55898	50.89673	45.20967
0.794328	106.9247	100.1436	83.99853	64.55897	50.89673	45.20967
1	106.9226	100.1432	83.99852	64.55897	50.89673	45.20967
10	106.3949	100.0272	83.99574	64.55895	50.89673	45.20967
100	95.44628	94.42315	83.72593	64.55653	50.89674	45.20969
1000	75.76282	75.76086	75.26006	64.32145	50.89757	45.21201
10000	55.72716	55.73761	55.83774	56.3148	50.97678	45.44745
100000	32.0483	32.05822	32.15767	33.1762	37.06015	33.99945

ตารางที่ ก-20 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.21

Frequency (Hz)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)	CMRR (dB)
	R0.001%	R0.01%	R0.1%	R1%	R5%	R10%
0.01	106.9881	89.34481	69.62496	49.70486	35.95505	30.21053
0.1	106.9885	89.3448	69.62496	49.70486	35.95505	30.21053
1	106.9879	89.34477	69.62496	49.70486	35.95505	30.21053
10	106.9876	89.34478	69.62496	49.70486	35.95505	30.21053
100	106.9323	89.34383	69.62495	49.70486	35.95505	30.21053
1000	103.3813	89.25086	69.62413	49.70487	35.95505	30.21052
10000	85.83173	84.31066	69.54319	49.7057	35.9552	30.21049
100000	65.66262	65.72128	64.83562	49.78521	35.96979	30.20722

ตารางที่ ก-21 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.22

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=2	G=20	G=40	G60	G=80	G=100
0.01	105.322	125.751	131.5677	135.0238	137.4919	139.4139
0.1	105.3219	125.751	131.5674	135.0239	137.4923	139.4142
1	105.322	125.7513	131.5675	135.0238	137.492	139.414
10	105.3196	125.7487	131.5652	135.0213	137.4896	139.4115
100	105.0872	125.516	131.3322	134.7878	137.2554	139.1765
1000	97.15586	117.5719	123.3588	126.7681	129.1726	131.0139
10000	77.85678	97.26823	100.8639	101.6235	101.3556	100.683
100000	56.95129	50.95488	52.6122	54.45556	55.36714	55.89613

ตารางที่ ก-22 แสดงรายละเอียดของภาพประกอบ 4.23

Frequency (Hz)	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR	CMRR
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
	G=2	G=20	G=40	G=60	G=80	G=100
0.01	105.3221	125.7463	131.5538	135.0005	137.4596	139.3724
0.1	105.3222	125.746	131.5536	135.0006	137.4599	139.3725
1	105.3221	125.746	131.5536	135.0004	137.4598	139.3724
10	105.3197	125.7436	131.5511	134.9981	137.4572	139.3699
100	105.0873	125.5112	131.3186	134.7655	137.2245	139.1372
1000	97.15622	117.5789	123.3847	126.8295	129.2861	131.1959
10000	77.86702	98.26608	104.0071	107.3476	109.662	111.3943
100000	57.85079	76.20051	78.11461	77.5904	76.46138	75.21419

ภาคผนวก ข.

นำเสนอผลงานทางวิชาการ ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 3 วันที่ 8-9 ธันวาคม 2547 ในหัวข้อเรื่อง “การออกแบบและ
พัฒนางจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลที่มีอัตราการจัดสัญญาณโหมคร่วมสูงและมีการกำจัด
แรงดันครีงเซลล์” (Design and Development of Biopotential Amplifier Circuit for High
Common-Mode Rejection Ratio and Suppress Half-Cell Potential)

การออกแบบและพัฒนางจรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล ที่มีอัตราการจัดสัญญาณโหมตรง่วมสูงและมีการกำจัดแรงดันครึ่งเซลล์

Design and Development of Biopotential Amplifier Circuit for High Common-Mode Rejection Ratio and Suppress Half-Cell Potential

น้อย โชมมาลา* สาวิตร ดันทนุช บุญเจริญ วงศ์กิตติศึกษา ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112
E-mail: s4512032@maliwan.psu.ac.th*

Noi Somala* Sawit Tanthanuch Booncharoen Wongkittisuksa Chusak Limskul
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: s4512032@maliwan.psu.ac.th*

บทคัดย่อ

การวัดสัญญาณไบโอโพเทนเชียลมีความสำคัญในการวินิจฉัยโรคและการตรวจรักษา เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความถูกต้องสมบูรณ์ วงจรที่ใช้จึงต้องมีความเที่ยงตรงแม่นยำ บทความนี้นำเสนอวงจรถยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อลดสัญญาณโหมตรง่วมและแรงดันครึ่งเซลล์ วงจรที่ออกแบบจะใช้ออปแอมป์ 5 ตัว สเตตแรกใช้ออปแอมป์ 4 ตัวและสเตตที่สองใช้ออปแอมป์ 1 ตัวเพื่อให้ได้อัตราส่วนการจัดสัญญาณโหมตรง่วมที่มีค่าสูง นอกจากนี้จะเพิ่มตัวคาปาซิเตอร์โดยต่ออนุกรมกับตัวต้านทานควบคุมอัตราขยายสัญญาณเพื่อคัปปลิงสัญญาณเอซี ผลของการออกแบบจะได้ อัตราการขยายสัญญาณเอซี 46 ดีบี อัตราการลดทอนสัญญาณดีซี 63.31 ดีบี และอัตราการจัดสัญญาณโหมตรง่วม 131.2 ดีบี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องกระตุ้นหัวใจด้วยไฟฟ้า เครื่องบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจ ฯลฯ

คำหลัก วงจรถยายสัญญาณ, ไบโอโพเทนเชียล, แรงดันครึ่งเซลล์, อัตราส่วนการจัดสัญญาณโหมตรง่วม,

Abstract

Biopotential measurements are used to medical diagnosis and treatment therefore precision circuits are required for signal acquisition system. This paper presents the improvement of biopotential amplifier to reduce common-mode signal and suppress half-cell potential. The proposed

circuit used 5-opamp, 4-opamp in first state and 1-opamp in second state, provide high common-mode rejection ratio (CMRR) and an extra capacitor is in series with resistor gain for AC coupling. In result, the design meet 46 dB for AC gain, -63.31 dB for DC gain and 131.2 dB for CMRR. The design will be intended for use in various applications, such as Holter-type monitors, defibrillators, Electrocardiogram(ECG) monitors, biotelemetry devices etc.

Keywords: Amplifier, Biopotential, half-cell potential common-mode rejection ratio (CMRR),

1. บทนำ

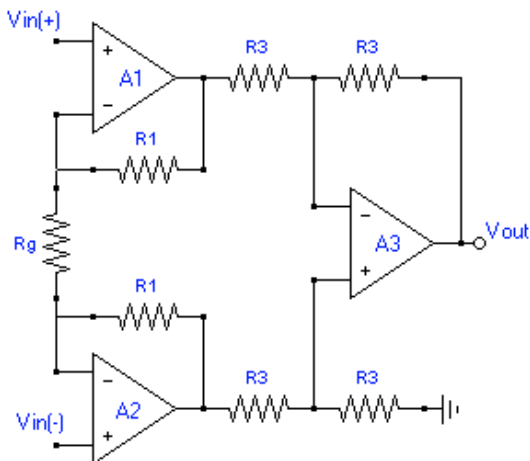
การวินิจฉัยโรคเกี่ยวกับโรคหัวใจ และกล้ามเนื้อ โดยใช้เครื่องวัดคลื่นสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจ และกล้ามเนื้อ (Electrocardiogram and Electromyogram) นั้นจะต้องใช้วงจรถยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล(Biopotential amplifier circuit) ที่มีความถูกต้องและเที่ยงตรงสูงมาก ๆ โดยทั่วไปจะใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูงทำให้มีราคาแพง ในงานวิจัยนี้เลือกวัสดุและอุปกรณ์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป โดยปรับปรุงวิธีการออกแบบบนพื้นฐานวงจรถยายอินสตรูเมนต์เซน (Instrumentation amplifier) เพื่อให้ได้เป็นวงจรถยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลทำให้มีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าค่อนข้างมาก และเป็นทรัพย์สินทางปัญญาของประเทศไทย จึงมีความเป็นไปได้สูงในการพัฒนาเทคโนโลยีในเชิงวิชาการ และเชิงพาณิชย์ ซึ่งคุณลักษณะทั่วไปของวงจรถยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียล สรุปได้ดังนี้ [1]

- อัตราการขยายประมาณ 200-1,000 เท่า (46 – 60 dB)
- ตอบสนองความถี่ ในช่วง 0.05 ถึง 500 เฮิร์ตซ์
- ป้องกันการอิมิตตัวของสัญญาณแรงดันตรงเนื่องจากแรงดันครีจเซลล์
- อัตราการขจัดสัญญาณโหมตร่วม (CMRR) มากกว่า 10,000 เท่า (> 60 dB)
- ความต้านทานด้านเข้าสูง (> 5 MΩ)

2. หลักการของวงจรถยายสัญญาณ [1]

วงจรถยายสัญญาณไบโโพอเทนเซียลจะนำเสนอที่มีพื้นฐานจากวงจรถยายอินสตรูเมนซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ 3 ตัวและตัวต้านทาน 7 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 จากวงจรแรงดันเอาท์พุท ขึ้นอยู่กับผลต่างของสัญญาณอินพุททั้งสอง กับ R_1 และ R_g ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$V_{out} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_g}\right) (V_{in(+)} - V_{in(-)}) \quad (1)$$



รูปที่ 1. วงจรถยายอินสตรูเมนสัญญาณพื้นฐาน

วงจรถยายอินสตรูเมนพื้นฐานจะมีข้อจำกัดคือไม่สามารถที่จะลดหรือกำจัดส่วนที่เป็นแรงดันไฟตรงที่ปะปนเข้ามาที่สัญญาณอินพุท และค่าอัตราการขจัดสัญญาณโหมตร่วม ก็จะถูกจำกัดด้วยความถี่ (frequency) และคุณสมบัติของออปแอมป์เอง

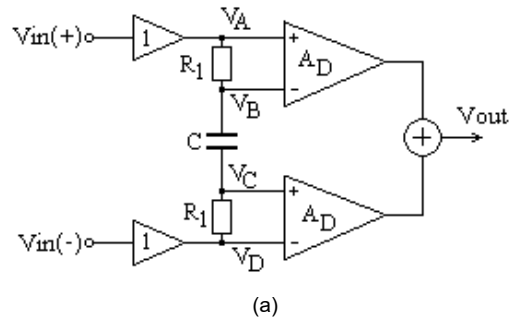
2.1 วงจรถยายสัญญาณที่ปรับปรุงแล้ว [2,4,5]

จากวงจรถยายอินสตรูเมนพื้นฐานได้ปรับปรุงวงจรเพื่อให้สามารถลดหรือกำจัดส่วนที่เป็นแรงดันไฟตรงและเพิ่มค่าอัตราการขจัดสัญญาณโหมตร่วม ให้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2a โดยมีวงจรถยายบัฟเฟอร์ (buffer amplifiers) เป็นสเตจแรก และคัปปลิงสัญญาณแอซซิดด้วยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ สำหรับสเตจที่สองจะจัดเป็นวงจรถยายความแตกต่าง(differential amplifiers, A_D) จำนวน 2 วงจร ซึ่งแต่ละวงจรจะขยายสัญญาณครึ่งหนึ่งของสัญญาณความแตกต่างอินพุท(differential input signal) โดย

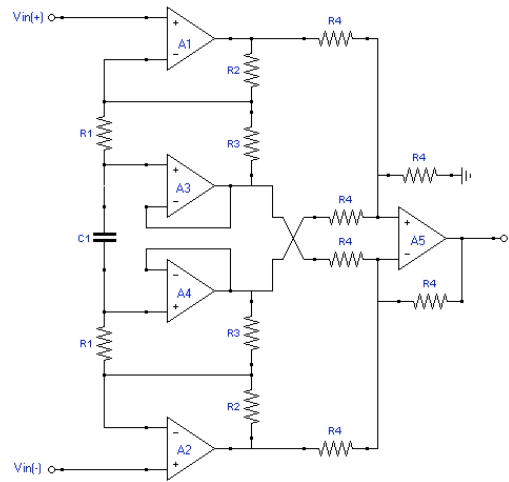
สัญญาณเอาท์พุทที่ได้เกิดจากการรวมสัญญาณเข้าด้วยกันสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\begin{aligned} V_{out} &= A_D(V_A - V_B + V_C - V_D) \\ &= A_D \left(\frac{2sR_1C}{1 + 2sR_1C} \right) (V_{in(+)} - V_{in(-)}) \quad (2) \end{aligned}$$

เมื่อ V_A, V_B และ V_C, V_D คือสัญญาณความแตกต่างอินพุท A_D คืออัตราขยายสัญญาณ (signal gain) ค่าคงที่ทางเวลา(time constant) ของวงจรเท่ากับ $2(R_1)(C)$



(a)



(b)

รูปที่ 2. วงจรถยายสัญญาณเครื่องมือ

(a) วงจรดั้งเดิม (b) วงจรที่ปรับปรุงแล้ว

รูปที่ 2b. แสดงรายละเอียดของวงจรที่ปรับปรุงแล้ว ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นภาคอินพุทและส่วนที่เป็นภาคเอาท์พุท โดยภาคอินพุทประกอบด้วยออปแอมป์จำนวน 4 ตัวคือ A_1, A_2, A_3 และ A_4 ซึ่ง A_1 และ A_2 เป็นตัวขยายหลักของวงจรถยายอินพุท A_3, A_4 เป็นวงจรถยายบัฟเฟอร์ (buffer amplifier) อัตราขยายเท่ากับ 1 แรงดันที่ขานอนอินเวอร์ตติงของ A_3, A_4 จะเท่ากับแรงดัน

ที่ R_1, R_3 ที่ต่อกันแบบขนาน ดังนั้นอัตราส่วนของกระแสที่ไหลผ่าน R_1 และ R_3 จะได้ดังสมการที่ (3)

$$\frac{I_{R3}}{I_{R1}} = \frac{R_1}{R_3} \quad (3)$$

ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่าน R_2 คือผลรวมของกระแสที่ไหลผ่าน R_1 และ R_3 ดังสมการที่ (4)

$$I_{R2} = I_{R1} + I_{R3} = \left(1 + \frac{R_1}{R_3}\right) I_{R1} \quad (4)$$

A_1 และ A_2 เป็นตัวขยายความแตกต่างสัญญาณอินพุตเอซี (AC signal input) ส่วนที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC component) จะถูกกำจัดทิ้งด้วย C

ภาคเอาท์พุทของวงจรคือวงจรถยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 (unity gain) โดยมีสัญญาณอินพุท 4 อินพุท จากสมการที่ (2) สามารถหาอัตราขยายความแตกต่าง (differential gain, A_D) ได้ดังสมการที่ (5)

$$A_D = 1 + \frac{R_2}{R_3/R_1} \text{ with } R_1 \gg R_3, A_D = 1 + \frac{R_2}{R_3} \quad (5)$$

ถ้าให้อัตราขยายแรงดันโหมดรวม (common mode voltage gain) และอัตราขยายแรงดันความแตกต่าง (differential mode voltage gain) เท่ากับ 1 สามารถคำนวณหา CMRR น้อยที่สุดของ วงจรได้จากสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} CMRR &= \frac{A_{(D1-4)}}{A_{(CM1-4)}} \times \frac{A_{D5}}{A_{CM5}} \\ &= A_D \times \frac{1}{4\delta / (1 + R_4/2R_4)} \\ &= A_D \times \frac{1.5}{4\delta} \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ δ คือค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ของ R_4 (คิดเป็น %) $A_{(D1-4)}$ คืออัตราขยายความแตกต่างของ A_1 ถึง A_4 $A_{(CM1-4)}$ คืออัตราขยายโหมดรวมของ A_1 ถึง A_4 A_{D5} คืออัตราขยายความแตกต่างของ A_5 A_{CM5} คืออัตราขยายโหมดรวมของ A_5

ถ้ากำหนดให้ $A_D = 1000$, $\delta = 1\%$ จากสมการที่ (6) จะได้ค่า CMRR น้อยที่สุดเท่ากับ 91.5 dB (คิดที่ออปแอมป์อุดมคติ)

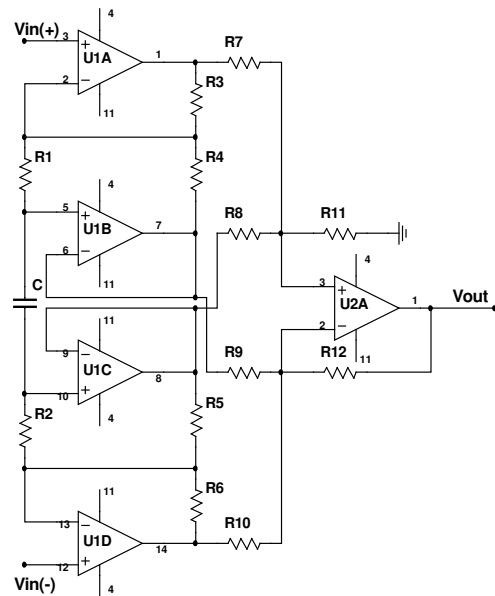
พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ แรงดันอินพุทออฟเซต ของออปแอมป์ โดยเฉพาะของ A_3, A_4 ซึ่งจะมีผลต่อเอาท์พุทของวงจร ส่วนแรงดันอินพุทออฟเซตของ A_1, A_2 นั้นไม่ทำให้เกิดค่าผิดพลาด (error) ของวงจร เพราะว่าสัญญาณอินพุทจะมีส่วนประกอบที่เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC component) ปะปนเข้ามาด้วย และถูกกำจัดทิ้งไปโดย C (capacitor) ค่าผิดพลาดสูงสุดของแรงดันเอาท์พุทที่เกิดขึ้นจากแรงดันออฟเซตของออปแอมป์มีค่าดังสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} V_{MAX} &= \left(V_{IOA3MAX} + V_{IOA4MAX} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_3} \right) \\ &+ 3V_{IOA5MAX} \approx 2A_D V_{IOA3,4MAX} \end{aligned} \quad (7)$$

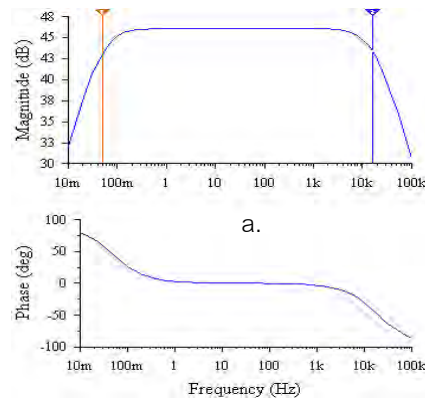
3. ผลการทดลอง

วงจรถยายสัญญาณที่ใช้จริงดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้ ออปแอมป์เบอร์ TL084 หรือเบอร์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน โดยให้ $C = 1 \mu F$, $R_1 = R_2 = 1.6 \text{ M}\Omega$, $R_3 = R_6 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 1 \text{ k}\Omega$, R_7 ถึง $R_{12} = 100 \text{ k}\Omega$ ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรถายสัญญาณได้จากสมการที่ (8) และมีการตอบสนองต่อความถี่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4

$$\begin{aligned} A_D(s) &= \frac{V_{out}}{V_{in(+)} - V_{in(-)}} \\ &= \frac{(2R_3R_4R_7 + 2CR_1R_4R_7 + 2CR_1R_3R_7)s}{(R_4R_7 + 2CR_1R_4R_7)s} \end{aligned} \quad (8)$$



รูปที่ 3. วงจรที่ใช้ทดลอง



รูปที่ 4 ผลการทดลอง

(a) อัตราการขยายกับความถี่ (b) การเปลี่ยนแปลงเฟสกับ

ความถี่

3.1 การหาอัตราการจัดสัญญาณโหมมตรงร่วม (Common Mode Rejection Ratio, CMRR) [1,5]

โดยหาได้จากสมการที่ (9)

$$CMRR = 20 \log \frac{A_D}{A_C} \quad (dB) \quad (9)$$

เมื่อ A_D คืออัตราขยายแบบ Differential Mode

A_C คืออัตราขยายแบบ Common Mode

และแสดงผลในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดลองอัตราขยายแบบ Differential and Common Mode

Freq.	Gain (เท่า)		CMRR (dB)
	A_D	A_C	
50Hz	200	5.5×10^{-5}	131.2
100Hz	200	5.5×10^{-5}	131.2
1kHz	200	5.44×10^{-5}	131.3
20kHz	129.3	6.6×10^{-5}	125.8
30kHz	97.1	8.07×10^{-5}	121.6

3.2 การหาอัตราขยายสัญญาณแรงดันตรง (DC gain) [3,5]

คุณสมบัติที่สำคัญอีกอันหนึ่งของวงจรรขยายอินสตรูเมน คือ ความสามารถในการกำจัดสัญญาณส่วนที่เป็นแรงดันกระแสตรงที่เกิดจากจุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดกับผิวหนังของคน ซึ่งแรงดันนี้ถ้ามีมากจะทำให้วงจรรขยายอินสตรูเมนอิ่มตัว[4] เป็นผลให้การวัดผิดพลาด โดยทำการทดสอบและแสดงผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ผลการทดลองอัตราขยาย AC และ DC

AC signal		DC signal		Gain _{AC}	Gain _{DC}
V_{in}	V_{out}	V_{in}	V_{out}	(dB)	(dB)
1mV	200mV	10mV	6.6uV	46	-63.61
1mV	200mV	20mV	76.7uV	46	-48.32
1mV	200mV	50mV	284uV	46	-44.91
1mV	200mV	100mV	637uV	46	-43.92
1mV	200mV	150mV	987.2uV	46	-43.64
1mV	200mV	300mV	2mV	46	-43.52
1mV	200mV	600mV	4.2mV	46	-43.09
1mV	200mV	1000mV	6.9mV	46	-43.22
1mV	200mV	1500mV	10.5mV	46	-43.09
1mV	200mV	2000mV	14.1mV	46	-43.03

4. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอวงจรรขยายสัญญาณไบโอโพเทนเชียลที่ใช้โอปแอมป์จำนวน 5 ตัว และคาปาซิเตอร์ ที่ต่ออนุกรมตัวต้านทานปรับค่าอัตราขยาย การตอบสนองด้านอัตราขยายและเฟสได้ดี ที่ความถี่ตั้งแต่ 0.05 Hz ถึง 16 kHz (รูปที่ 3) ซึ่งทำให้วงจรมีอัตราขยายสัญญาณโหมมตรงร่วม (CMRR) สูงถึง 131.2 dB และอัตราการลดทอนสัญญาณดีซี 43.03 dB ซึ่งวงจรรขยายไบโอโพเทนเชียลพื้นฐานไม่สามารถทำได้ จากผลการทดสอบที่ได้วงจรมناسبةที่จะนำไปต่อใช้งานกับ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าขนาดเล็ก ๆ เช่น เครื่องกระตุ้นหัวใจด้วยไฟฟ้า เครื่องบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจ เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าหัวใจ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] John G. Webster, 1995. "Medical Instrumentation Application and Design", John Wiley & Sons INC., New York, p. 814.
- [2] Dobromir Dobrev, 2003: High-CMRR instrumentation amp works with low supply voltages, EDN, October 2: 88 - 90
- [3] Martin J. Burke and Denis T. Gleeson, 2000. "A Micropower Dry-Electrode ECG Preamplifier", IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.47, 2000: 155 – 162.
- [4] Enrique M. Spinelli, Ramon Pallas – Areny and Miguel Angel Mayosky, 2003. "AC Coupled Front-End for Biopotential Measurements", IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.50, 2003: 391-395,
- [5] Enrique M. Spinelli and Miguel Angel Mayosky, 2000 "AC Coupled Three op-amp Biopotential Amplifier with Active DC Suppression", IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.47. 2000: 1616-1619