

วิธีการออกแบบวงจรกรองและวงจรกรองแบบกลับโหมตกระแส แบบต่ำผ่านและสูงผ่านโดยใช้ FTFN เป็นอุปกรณ์หลัก

บุญรักษ์ จิปีภ ¹

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 ประเทศไทย

วัลลภ สุระกำพลธร ²

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 ประเทศไทย

เคนโซ วาดานาเบ้ ³

มหาวิทยาลัยชิซุโอกะ ฮามามัทชิ 432-8011 ประเทศญี่ปุ่น

บทคัดย่อ

บทความนี้ ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตามลำดับชั้นอย่างเป็นระบบสำหรับออกแบบวงจรกรองและวงจรกรองแบบกลับโหมตกระแส แบบต่ำผ่านและสูงผ่านโดยใช้ FTFN เป็นอุปกรณ์หลัก ลำดับชั้นการออกแบบจะใช้ การวิเคราะห์โครงข่ายอนุลเลอร์และการแปลงคู่แฝง RC:CR เงื่อนไขเพิ่มเติมสำหรับการแปลงที่ถูกต้องจากวงจรกรองโหมตแรงดันโดยใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก ไปเป็นวงจรกรองและวงจรกรองแบบกลับโหมตกระแสโดยใช้ FTFN เป็นอุปกรณ์หลัก ก็ได้แสดงไว้ด้วย เงื่อนไขเพิ่มเติมเหล่านี้จะทำให้วงจรกรองมีการตอบสนองอัตราขยายและเฟสถูกต้อง

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

² ศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

³ ศาสตราจารย์ สถาบันวิจัยอิเล็กทรอนิกส์

2 QVH5 HDQ DMRQRI & XUHQVRGH FTFN-Based / RZ 3 DW DQG+ LJK3 DW) LOMU DQG7 KHLUQYHUVH) LOMU

%RRQUN&KISISRS ¹

. LQJ 0 RQJ NXWV8 QLYHMLW RI 7 HFQRORJ \ 7 KRQEXL Bangmod, 7RRQJNU %DQJ NRN7 KLDQDQ

Wanlop XLDNPSRQMLQ ²

. LQJ 0 RQJ NXWV, QVWVXVHRI 7 HFQRORJ \ / DGNUEDQJ / DGNUEDQJ %DQJ NRN7 KLDQDQ

. HQR: DMQDEH ³

6KLXRND8 QYHMLW + LP LP DWX-DSDQ

\$ EWWDFW

7 KHSURFHGXUHRUKHM VWP DNEFDHDD DMRQRI FXUHQVRGH) 7) 1 EDMGGBZ SDWDQDQ
KJ KSDMVICMLVDQGVKHLUQYHUVHICMLVDSURSRVHGQVLSLSH7 KHLDQ DMRQSURFHGXUHV
XVQD HMKH nullorQZ RUNDQDQ VMDQGVLF & &5 GXLDMDQMRUP DMRQ\$ GGHFRQGVWRQMRUKH
FRUHFMDQMRUP DMRQIURP DYRQV HP RGRS LP S EDMGICMLVWVFXUHQVRGH FTFN-based
IICVADQGLVMQYHUVHICMLVDSURJ IYHQ7 KHMDCGHFRQGVWRQV IYHERVWVHFRUHFVWQDQDQ
SKDMHHSRQVHRI VKHICMLV

¹ #UUNVQ? TQHLUQ&GRCTOCPVQHQORVIG? PIRGGRPI

² ZQHLLQ&GRCTOCPVQHNEMQPEU

³ ZQHLLQI GUCIEI #PUWVQVHNEMQPEU

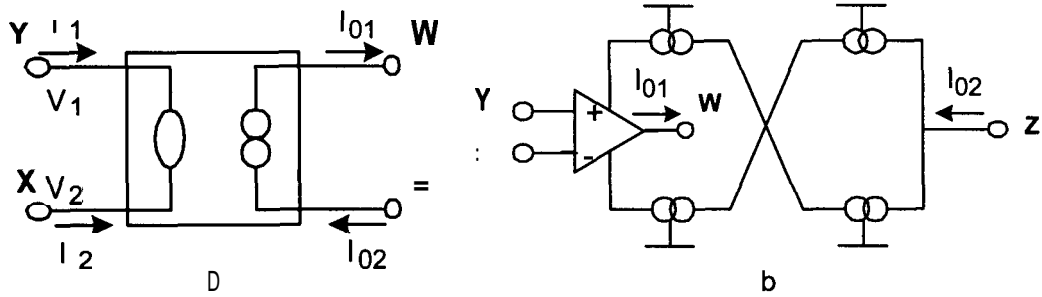
, QMRGFWRQ

3 UHMQW VHHMFRMCHUDEOIQMLHMQRVHGMLQRI FXLHQMRGFILFXIW/ KIMYGXH
 WVKDMH SURYIGHMFSRWQWLDGYDQM HAVFKDZ IGHG QP IF UQI HQKHQMGHEDQZ IGAK
 VPSOHFILFXIW DQGBZ SRZ HFRQXP SWRQ [1]. KHDFWYHGHMEHMKDMHEHQXVHGRUKH
 UHDDVRQRI FXLHQMRGFILFXIWDHRIH DP SOMRXUMP IQDDDMQI QXDUV (FTFNs)R
 RSHLMDDDDMQI DP SMLHV (OFAs)DQFXLHQFRQYH RVV (CCIIIs). HQHDD WH current-
 P RGHFILFXIWSDUFXDUQ D 7) 1 EDMGFILFXIWDG&&, EDMGFILFXIWDQMP SQ EHLDDHG
 WLRXJ KD\ VWP DWF WDMRUP DMRQEDMGRQWKHVRH D nullor RCHZ KIEKFRQWVQI RI D
 QODMDQGDQRUDRURP WHZ HOHMHDSHGYRQW HP RGF5 & DFVWFILFXIW> - 5]. +RHMU
 IURP WHMDQMRUP HGnullorHIXYDCHMULFXIWWKHLDHMRP HGLIEXVEMQFKRRVQI SURSHDFWYH
 GHMHRMUKHLDHDDVRQRI FXLHQMRGFILFXIW) RUH DP SOML RQHMLP IQDRI DQXODRUV
 QFRQCFWGWVRQHMLP IQDRI DQRUDRUKHQZ HFDQQRMSDFHMKH nullator/noratorSIE\ D
 CCII [2]. XUMLP RUHQWHMDQMRUP DMRQE\ DSSQIQI DQ adjointQVZ RNFRQFHVVRP HRI WH
 UHXOMGFILFXIWMRGFILFXIWDHP SDFWEDCHHRWKH UHXLHQBZ IP SHGDFHFXLHQMRXLFHV
 [3]. MMEHQCHP RQWMDMGUHFHQW WDE\ XMQI D 7) 1 ZHFDQDMQ UHDFHMKH nullator/
 QUDMUSDLZ INKD FTFN MKRXMIXLIQI DQ FRQGWRQV [4]. QDGGMRQE\ GHIMQI WLRXJKWH
 XMRI WH5 &&5 GXMDQMRUP DMRQWHMDQMRUP HGFILFXIWMRCH FTFN-based IIFXIMIXLHV
 DKL KRXWVWV SHGDFHMRXLFH KIEKIVXWVEQZ INKDFXLHQMRXLFHDQGDORHQDEOMWFILFXIW
 WEHVKHGQDFDFDGHGIRUP [6]. KVP HDQWDMH 7) 1 IMP RUHQI IEOBQGDORXQG
 EXCGQ EBFNWKDQD&&, ,

, QFRP P XQIEDMRQFRMRDQGLQWVWP HQWVRQV VWP VKHLMVMDMRQIQZ KIEKDMI QDO
 KDVEHQGVARUMGE\ DSURFHMQI RUDMDQP DVMRQV VWP DQGIMQFHMDU\ WUFRYHUKHQSWX
 VI QDURP WHDMDDEORXWXM QDKVFDQRI WQEHGRQE\ XMQI DQIQYHVMHCOMKDKMD
 IUHXHQ\ UHSRQMHZ KIEKIVKHFISURFDR WHUHXHQ\ UHSRQMRI WHM VWP WDMVXHGWH
 CVMURQ) RUKHGLIMML QDSURFHMQI JHQLD HMGRMRUREVMQIQI GLIMQYHMHCOMV
 KDVEHQZ HEMVEOMKH [7]. +RHMURUDQDQDU IQYHMHCOMRQD DHZ Z RUNKDMHEHQ
 UHSRUMGDQWVHVR systematicalUHDDVRQSURFHGXLDYDDEOI [8,9],XVDFHQW %&KISIRS
 DQG: 6 XUNP SRQRUQ[10] URSVHGWFH SURFHGXLHMKHIQGWHEP SRUMQFRQGWVRQIQWF5 &&5
 GDMQMRUP DMRQEXRQJ JDIQVFRUHFQRFROMGHDMRQRI WHMDQMRUP HGSKDMH QWLV
 SDSHUKHSURFHGXLHUKHV VWP DWFDDHDDVRQRI WFFXLHQMRGH) 7) 1 EDMGLIOMDQGLW
 IQYHMHCOMVXWVHG7 KHP HMRGXVQI HMKH nullorQVZ RUNDQDQVMDQGW5 &&5 GXDO
 WDMRUP DMRQ5 CGHFRQGWVRQMRUKHFRUHFMDQMRUP DMRQIURP WHYRQW HP RGH op-amp-
 EDMG6DQDQ H QZ SDMDQGLI KSDMCOMVWVWVFXLHQMRGH FTFN-basedRZ SDMDQD
 KJ KSDMCOMMDQGWVHUQYHMBZ SDMDQGIQYHMKL KSDMCOMMDUH IYQDWHH DP SOM

3 URHGXLHRI WDQMRUP DMRQ

) LJ QV KRZ VD nullor PRGE D) 7) 1 ZKHUHLWSRUWDQMRQ/FDQEHFKUDFWUJ HG
 DV, I_2 9 V_2 DQ I_{01} I_{02} . HCHUDQ W H R X S X P S H G D Q F H V R I W H = D Q G : S R U W
 FDQEH D U E L W D U + R Z H Y H U Q M L V S D S H U D) 7) 1 R I W H W S H V K R Z Q I Q) L J Q E L V H P S Q H G
 Z K H U H W H R X S X P S H G D Q F H R I W H S R U W L V Y H U K L J K D Q G W H R X S X P S H G D Q F H R I W H S R U W
 : L V Y H U Q Z : W K P D Q K L J K T X D Q W Y R Q W H P R G H R S D P S E D V H G 5 & F L F X L W K D Y H E H H Q
 Z H Q M D E O K H G Z H F R Q M G H U H W D Q M R U P D M R Q R I D Y R Q W H P R G H R S D P S E D V H G F L F X L W
 D F X U H Q P R G H) 7) 1 E D V H G F L F X L W



) L X U H Nullor PRGE D) 7) 1

7KH SURFHGXUHIRUWKHUHQDQMRQRI W H F X U H Q P R G H) 7) 1 E D V H G I Q M U W J L Y H Q D V
 I R Q Z V

HSDFLQJ RS DP S I Q M W H Y R Q W H P R G H R S D P S E D V H G I Q M Z L W D nullor.

URUP W H 5 & & 5 G X D Q D Q M R U P D M R Q [4].

Q D O V L W H R E V L Q H G Q H Z R U N R I L Q G W H D G G H G I P S R U D Q F R Q G L M R Q V X V I Q J W H
 nullor Q Z R U N D Q D O V L > 1].

HSDFLQJ W H nullor W K) 7) 1 W H Q M H F X U H Q P R G H) 7) 1 E D V H G I Q M U W
 U H Q J H G

W Q J W H S R U W R I W H I Q S X F X U H Q P R X U F H V R H Q X U H W H F R U H F W H W R I W H
 S K D V H R I W H R E V L Q H G I Q M U

7KH SURFHGXUHIRUWKHUHQDQMRQRI W H F X U H Q P R G H) 7) 1 E D V H G I Q M U W J L Y H Q D V
 J L Y H Q D V I R Q Z V

R I G H U R H Q X U H W H V E L O W R I W H W D Q M R U P H G I Q M U W Q H F H W D U W D M H
 W D Q M H U X Q F V R Q R I W H F K R M H Q R S D P S E D V H G F L F X L M D V D P I Q P X P S K D V H I X Q F V R Q R Q R
 L W K M D O V S D Q H J H U R V

HSOFIQ RS DP S IQWHYROM HP RCHS DP S EDVHGICMZ DKD nullor.

MKLQJ VHKQRUDRUDQGWHGUMQJ YROM HVRXLFH [9].

HIRUP VHF &&5 GXMDDMRUP DMRQ [4].

DD VVWVREVIQHGQHZ RUNVRIIQGWVH DGGHGP SRUMQFRQGVRCVMQJ VWH nullor
 QHVRUNDQDQVY > 11].

HSOFIQ VWH nullor MK) 7) 1 VHQVHFXUHQRCH FTFN-basedIQHLMIMIV
 UHDDHG

QHUMQJ VHSRDUW RI VHQSVXUHQVXLFHVRHQVXUHQVHUMGSKDRI VWH
 REVIQHGQYHVICMU

([DP SOH &RQCHLD6DDQ. H 2nd-order R DP S EDVHGQZ SDVICMVKRZ QIQ) II
 2a, KHLHMYROM HP RCHMDQMHIHQFVRQRI VWHICMUMIYHQE\

$$\frac{V_0}{V_I} = \frac{k \left[\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right]}{s^2 + s \left[\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1-k}{R_2 C_2} \right] + \left[\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right]} \quad (1)$$

: KHLH $k = 1 + \frac{R_F}{R_G}$. 7 KH nullorUHSUMHMMVRQRI VHFILFXIV) II DIVKRZ QIQ) II E
 7 KH nullor IIFLW after the 5 &5 GXMDDMRUP DMRQIVKRZ QIQ) II 2c. UR VHXVQHFILFXIV
 DDQ VVWVHFXUHQRCHMDQMHIHQFVRQRI VHFILFXIV) II 2cII IYHQE\

$$\frac{V_0}{I_I} = \frac{k' \left[\frac{1}{R'_1 R'_2 C'_1 C'_2} \right]}{s^2 + s \left[\frac{1}{R'_1 C'_1} + \frac{1}{R'_1 C'_2} + \frac{1-k'}{R'_2 C'_2} \right] + \left[\frac{1}{R'_1 R'_2 C'_1 C'_2} \right]} \quad (2)$$

: KHLH $k' = 1 + \frac{R'_G}{R'_F}$.
 : HIQGWVHMMV DGGHGP SRUMQFRQGVRCVMDH
 $R'_1 = C_1, C'_1 = R_1, R'_2 = C_2, C'_2 = R_2, DQG R'_F = R_G, R'_G = R_F$ (3)

RUMHRVHVMHV DGGHGP SRUMQFRQGVRCVMDH
 $R'_1 = R_1, C'_1 = C_1, R'_2 = R_2, C'_2 = C_2, R'_F = R_G, R'_G = R_F DQG R_1 C_2 = R_2 C_1$ (4)

% UHSOFIQ VHnullor MKWH) 7) 1 DQGIQYHUMQJ VHSRDUW RI VHQSVXUHQVXLFH
 VHFVXUHQVRGH6DDQ. H 2nd-order) 7) EDVHGQZ SDVICMURI VWH) II GIVREVIQHG

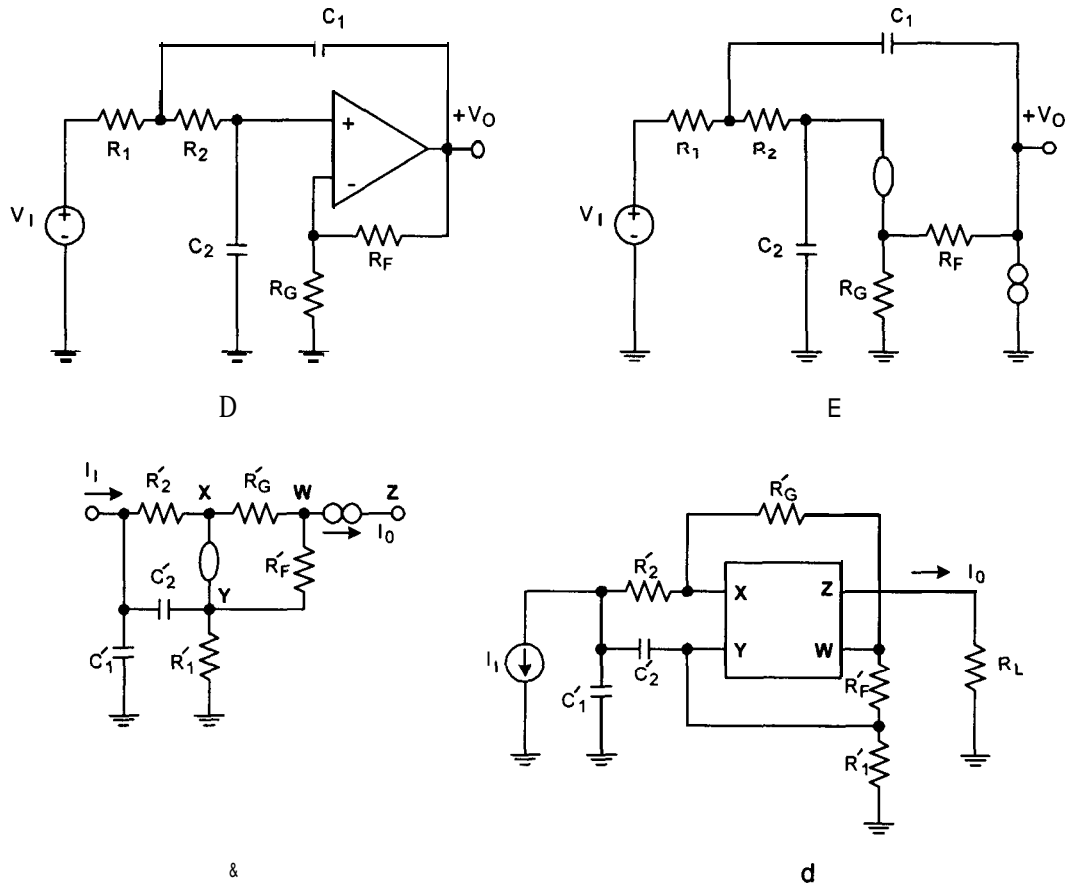
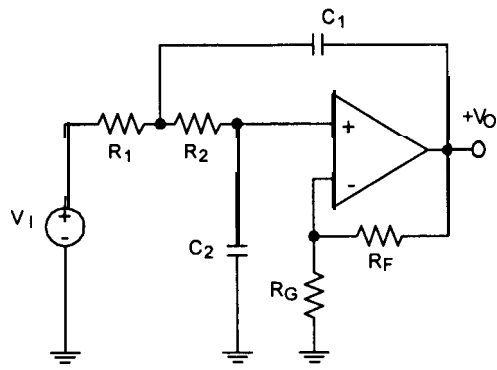


Figure 3 (a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (h) (i) (j) (k) (l) (m) (n) (o) (p) (q) (r) (s) (t) (u) (v) (w) (x) (y) (z) (aa) (ab) (ac) (ad) (ae) (af) (ag) (ah) (ai) (aj) (ak) (al) (am) (an) (ao) (ap) (aq) (ar) (as) (at) (au) (av) (aw) (ax) (ay) (az) (ba) (bb) (bc) (bd) (be) (bf) (bg) (bh) (bi) (bj) (bk) (bl) (bm) (bn) (bo) (bp) (bq) (br) (bs) (bt) (bu) (bv) (bw) (bx) (by) (bz) (ca) (cb) (cc) (cd) (ce) (cf) (cg) (ch) (ci) (cj) (ck) (cl) (cm) (cn) (co) (cp) (cq) (cr) (cs) (ct) (cu) (cv) (cw) (cx) (cy) (cz) (da) (db) (dc) (dd) (de) (df) (dg) (dh) (di) (dj) (dk) (dl) (dm) (dn) (do) (dp) (dq) (dr) (ds) (dt) (du) (dv) (dw) (dx) (dy) (dz) (ea) (eb) (ec) (ed) (ee) (ef) (eg) (eh) (ei) (ej) (ek) (el) (em) (en) (eo) (ep) (eq) (er) (es) (et) (eu) (ev) (ew) (ex) (ey) (ez) (fa) (fb) (fc) (fd) (fe) (ff) (fg) (fh) (fi) (fj) (fk) (fl) (fm) (fn) (fo) (fp) (fq) (fr) (fs) (ft) (fu) (fv) (fw) (fx) (fy) (fz) (ga) (gb) (gc) (gd) (ge) (gf) (gg) (gh) (gi) (gj) (gk) (gl) (gm) (gn) (go) (gp) (gq) (gr) (gs) (gt) (gu) (gv) (gw) (gx) (gy) (gz) (ha) (hb) (hc) (hd) (he) (hf) (hg) (hh) (hi) (hj) (hk) (hl) (hm) (hn) (ho) (hp) (hq) (hr) (hs) (ht) (hu) (hv) (hw) (hx) (hy) (hz) (ia) (ib) (ic) (id) (ie) (if) (ig) (ih) (ii) (ij) (ik) (il) (im) (in) (io) (ip) (iq) (ir) (is) (it) (iu) (iv) (iw) (ix) (iy) (iz) (ja) (jb) (jc) (jd) (je) (jf) (jg) (jh) (ji) (jj) (jk) (jl) (jm) (jn) (jo) (jp) (jq) (jr) (js) (jt) (ju) (jv) (jw) (jx) (jy) (jz) (ka) (kb) (kc) (kd) (ke) (kf) (kg) (kh) (ki) (kj) (kk) (kl) (km) (kn) (ko) (kp) (kq) (kr) (ks) (kt) (ku) (kv) (kw) (kx) (ky) (kz) (la) (lb) (lc) (ld) (le) (lf) (lg) (lh) (li) (lj) (lk) (ll) (lm) (ln) (lo) (lp) (lq) (lr) (ls) (lt) (lu) (lv) (lw) (lx) (ly) (lz) (ma) (mb) (mc) (md) (me) (mf) (mg) (mh) (mi) (mj) (mk) (ml) (mn) (mo) (mp) (mq) (mr) (ms) (mt) (mu) (mv) (mw) (mx) (my) (mz) (na) (nb) (nc) (nd) (ne) (nf) (ng) (nh) (ni) (nj) (nk) (nl) (nm) (no) (np) (nq) (nr) (ns) (nt) (nu) (nv) (nw) (nx) (ny) (nz) (oa) (ob) (oc) (od) (oe) (of) (og) (oh) (oi) (oj) (ok) (ol) (om) (on) (oo) (op) (oq) (or) (os) (ot) (ou) (ov) (ow) (ox) (oy) (oz) (pa) (pb) (pc) (pd) (pe) (pf) (pg) (ph) (pi) (pj) (pk) (pl) (pm) (pn) (po) (pp) (pq) (pr) (ps) (pt) (pu) (pv) (pw) (px) (py) (pz) (qa) (qb) (qc) (qd) (qe) (qf) (qg) (qh) (qi) (qj) (qk) (ql) (qm) (qn) (qo) (qp) (qq) (qr) (qs) (qt) (qu) (qv) (qw) (qx) (qy) (qz) (ra) (rb) (rc) (rd) (re) (rf) (rg) (rh) (ri) (rj) (rk) (rl) (rm) (rn) (ro) (rp) (rq) (rr) (rs) (rt) (ru) (rv) (rw) (rx) (ry) (rz) (sa) (sb) (sc) (sd) (se) (sf) (sg) (sh) (si) (sj) (sk) (sl) (sm) (sn) (so) (sp) (sq) (sr) (ss) (st) (su) (sv) (sw) (sx) (sy) (sz) (ta) (tb) (tc) (td) (te) (tf) (tg) (th) (ti) (tj) (tk) (tl) (tm) (tn) (to) (tp) (tq) (tr) (ts) (tt) (tu) (tv) (tw) (tx) (ty) (tz) (ua) (ub) (uc) (ud) (ue) (uf) (ug) (uh) (ui) (uj) (uk) (ul) (um) (un) (uo) (up) (uq) (ur) (us) (ut) (uu) (uv) (uw) (ux) (uy) (uz) (va) (vb) (vc) (vd) (ve) (vf) (vg) (vh) (vi) (vj) (vk) (vl) (vm) (vn) (vo) (vp) (vq) (vr) (vs) (vt) (vu) (vv) (vw) (vx) (vy) (vz) (wa) (wb) (wc) (wd) (we) (wf) (wg) (wh) (wi) (wj) (wk) (wl) (wm) (wn) (wo) (wp) (wq) (wr) (ws) (wt) (wu) (wv) (ww) (wx) (wy) (wz) (xa) (xb) (xc) (xd) (xe) (xf) (xg) (xh) (xi) (xj) (xk) (xl) (xm) (xn) (xo) (xp) (xq) (xr) (xs) (xt) (xu) (xv) (xw) (xx) (xy) (xz) (ya) (yb) (yc) (yd) (ye) (yf) (yg) (yh) (yi) (yj) (yk) (yl) (ym) (yn) (yo) (yp) (yq) (yr) (ys) (yt) (yu) (yv) (yw) (yx) (yy) (yz) (za) (zb) (zc) (zd) (ze) (zf) (zg) (zh) (zi) (zj) (zk) (zl) (zm) (zn) (zo) (zp) (zq) (zr) (zs) (zt) (zu) (zv) (zw) (zx) (zy) (zz)

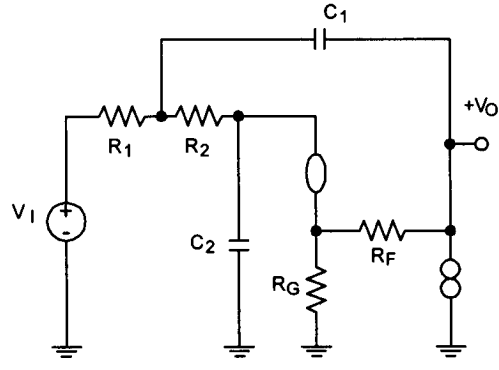
([DP SCH 7R REVMQKH) 7) 1 EDHGIQHVHBZ SDWICMRI WHFUFXW IL D
 JDLQKRZ (IQ) IL DIVFRQMGHFG7 KH nullor UESHMMDRQRI WHFUFXW) IL DIVKRZ Q
 IQ IL E7 KH nullor IUFXLWVWVZ IWKIQ WHGUMQ VRLXFHDQGMHQRUDRUDQGLDMMKH
 5& &5 GANDQMRUP DRQDFHKRZ QQ IL 3cDQ) IL 3d, USHFVWQ) URP URXIQHUFXW
 DQD) VVMFXUHQVRGHQYLVNDQMHNQVDRQRI WHFUFXW) IL GIVDHFQ

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{1}{k' \left[\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right] \left[s^2 + s \left[\frac{1}{5R_2 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1-k'}{C_2} \right] + \left[\frac{1}{5R_2 C_2} \right] \right]} \quad (5)$$

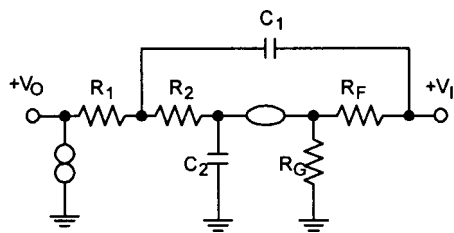
7 KH DGGHGP SRUDMRCVBRQDUHMHMP HDX ([DP SDMKRZ QQHIXDIRQRU
 HIXDNBQ
 %) UFSDFIQ WHnullor DKKH FTFNDQIQHVWQ WHSRDUW RI WHQSXMUHQW
 VRLXHMFXUHQVRGH6DQ) H 2nd-RCHU FTFN-basedIQHLMRZ SDWICMRI WH) IL H
 DREVMQHG



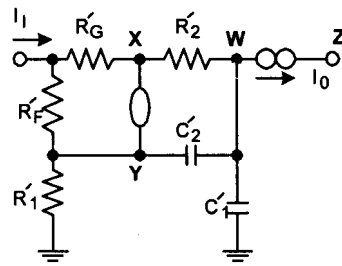
D



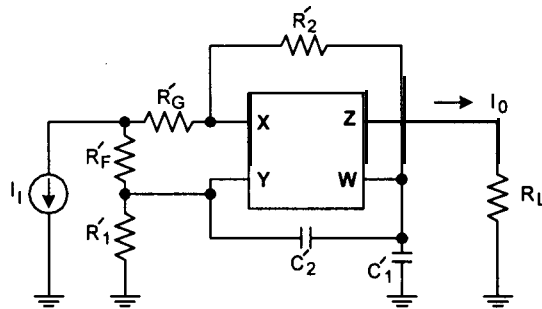
E



&



G



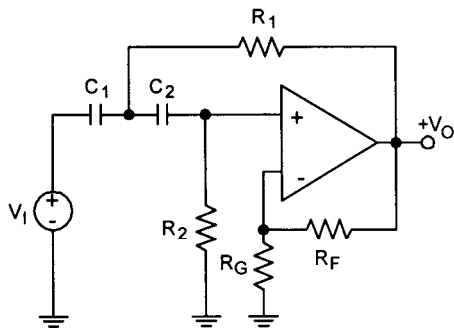
e

) L X U H 3 U R F H G X U H I R U K H U H D Q J D M R Q R I V K H F X U H Q P V R G H) 7) 1 E D V H G L Q Y H U H Q R Z S D W I L Q M U

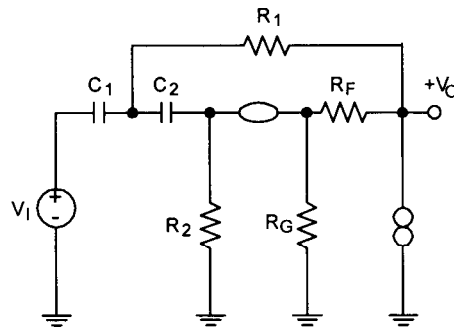
6 IP X D M R Q U H X O V R I V K H F I L E X I V I Q I J D Q G

7 K H S H U R U P D Q F H R I V K H I C M X I Q I L D Q G K O Y E H H Q M P X D M G V U R X I K M H X V H R I
 P S p i c e D Q Q V P X D M R Q S U R U P I Q R G H W Y H U H V K H F R U H F V H M R I V H U H D Q J D M R Q S U R F H G X H / K H
 F T F N D U H D Q H G Z I N D Q H J D M H R S H U D M R Q P D I U R U H G P S O H I Z 0 \$ Z K I E F R O M V W
 \$ ' , & R S D P S 2 N 2 2 2 2 A 1 3 D Q G I \$ 3 1 3 W D Q M V R U V [12]. K H I C M I R U f_p
 k H z , K H L H R_F = R_G = 1 k \Omega , R_1 = R_2 = 1.6 k \Omega , C_1 = C_2 = 0.1 \mu F D Q M H R D G U H M V M Q F H R_L = 10 k \Omega D V
 X H G D M S U R W W S H R U H D Q H W H F X U H Q M R C H I C M D Q G I Q M H U H I C M R I) I I G D Q) I I H) I I
 V Z V K H I U H X H Q F U H S R Q H M R I V K H F X U H Q M R I I_0 / I_1 R V K H F X U H Q M R C H I C M D Q G I W Q M H V H
 I I V I Q F R P S D M R Q Z I V K M H U H X H Q F U H S R Q H M R I V K H R O M H U D M R V_0 / V_1 R V K H R U I I Q I C M U

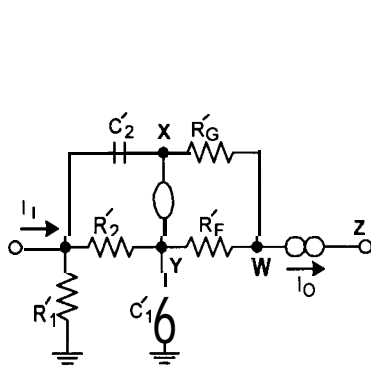
๖) UHSDFIQ nullor MKWH 7) 1 DQGICYHUQI WFSROUW RI WHQSXUXUHQRXLFH
 WHFXUHQMRGHDDQ H 2nd-order 7) EDMHGKJKSDMIOQRI WH IL GYREWQHG



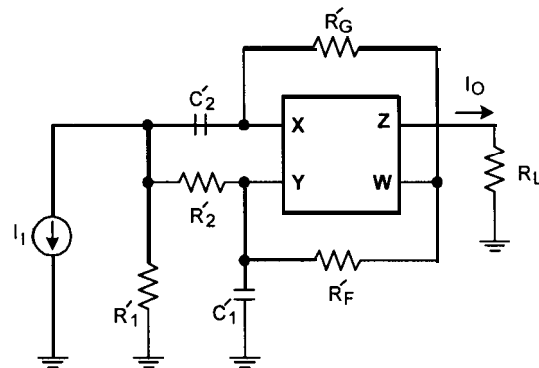
D



b



&



G

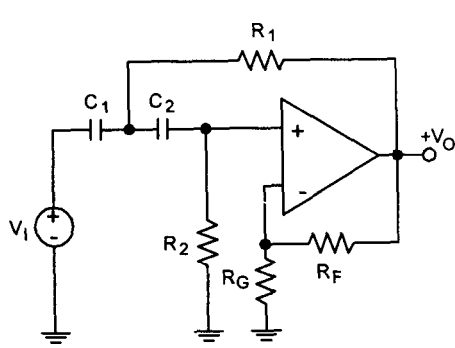
) LXUH3 URFHGUXHIRMKUHQDQ DMQRRI WHFXUHQMRGH 7) 1 EDMHGKJK SDWLOMU

([DP SCH RREWQWH 7) 1 EDMGICYHUHKILKSDMIOQRI WHFILXIQ) IL D
 JIQMRZ QIQ Fig.6a)IFRQGHG7 KH nullorUHSUHMQRRI WHFILXIQ) IL DVMRZ Q
 IQ IL E7 KH nullor IIFXLWIVMZ IWKIQ WHGUYQI VRXIFDQWHQRUDRUDQGDIVMKH
 RC:CRGMQMRUP DMQRDUHKRZ QIQ IL 6cDQ IL 6d,UHSMWHQ) URXWHFILXIW
 DDQ VWHFXUHQMRGHQYHUHMDDMHIXQVRQRI WHFILXIQ) IL GIMYHQE

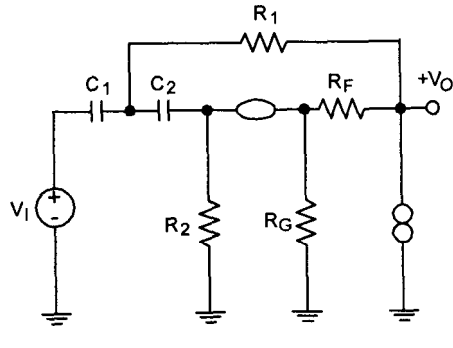
$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{1}{k's^2} \frac{1}{s^2 + s \left[\frac{1}{R'_2 C'_2} + \frac{1}{R'_1 C'_2} + \frac{1-k'}{R'_1 C'_1} \right] + \left[\frac{1}{R'_1 R'_2 C'_1 C'_2} \right]} \quad (10)$$

7 KHGGGIP SRUWQRQGMVRQDUHKMMP HM [DP SGMKRZ QIQHXDMQRU
 HIXDMRQ

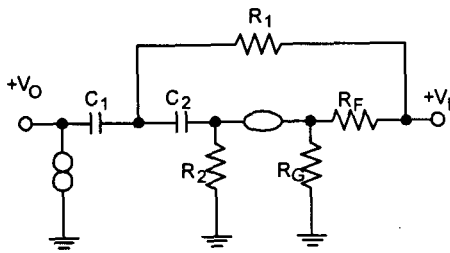
การวิเคราะห์และพัฒนาระบบกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับสองที่มีลักษณะเป็นแบบอินทิเกรตที่มีขั้วต่อแบบต่าง ๆ



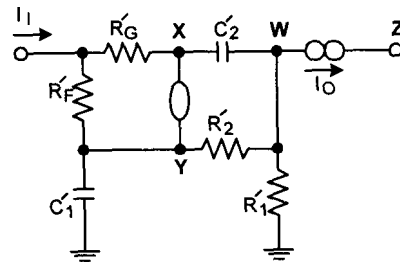
D



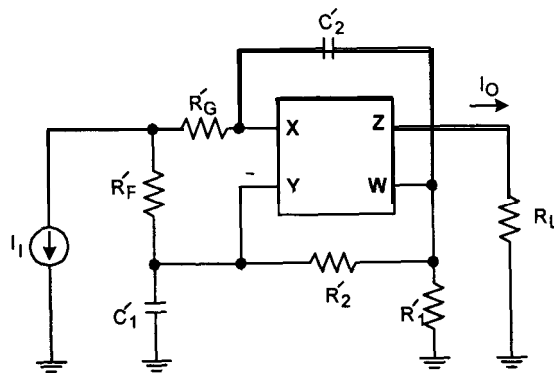
E



C



G



G

การวิเคราะห์และพัฒนาระบบกรองสัญญาณความถี่ต่ำอันดับสองที่มีลักษณะเป็นแบบอินทิเกรตที่มีขั้วต่อแบบต่าง ๆ

&RQFVMRQ

, QVKSLSHZ HKMHSRVRVGVKHSURFHGXUMRUKHV VWP DNEFMDQMRUP DMRQRI D
YRQW HP RGHS IP S EDMHGICMURVKFXUHQRCH) 7) 1 EDMHG filterDQVMQYHVMHICMU
7 KHLHD, DMRQSURFHGXUHVM, HMKH nullor QV RUNDQDQ VMDQGVKHS &&5 GXMDQMRUP DMRQ

7 KHMMDQMRUP HGIOMUKDYHKU KRXXWV/ SHGDQFHZ KIEFKHCEOMKHMMDQMRUP HGIOMUK
HXVHGIQFDVFDGHRUP &RQGVBRQMQRUGHRUJ HMKFRUHFMDQMRUP DMRQVMDMXXVMQVKH
HRUHMVQDQGSKMDLHSRQVMRI DYRQW HP RGHS IP S EDMHGICMURVKFXUHQRCH
) 7) 1 EDMHGICMUDQGMQYHVMHICMUKDYHDOREHQP HQMRQHG

\$ ENQRZ CHJP HQW

7 KHXWKRUZ RXGONHARDFNQRZ DGI HZ IKVKDQNI RUKHVAIQV VSSRURV WIVZ RUNE
WHI DMRQD6FIHQFHQD7 HFKQRBU\ ' HMBSP HQW HQ\ 1 \$67' \$ 7 KIDQGVKHI DMRQD
(OFWRQIFVDQ&RP SXWJ HFKQRBU\ &HQMI (&7 (&7 KIDQGVKHS DSDQ, QMCDMRQD
&RRSHUDMRQ\$ JHQF\ -, &\$ DQGVKHS DSDQ6 RFIHV IRUKH BURP RWRQRI 6 FIHQHV-636

7 KHXWKRUDORZ RXGONHARDFNQRZ DGI HZ IKVKDQNI RUDQH FHDQWSIQ VHK
P DQXVLSW WIVSDSHE\ 0 US SIFKDWHSUDMLGMQ

5 HHLQH

,/621 %35 HFQVMBSP HQMQFXUHQRQYH RUMDQGFUXHQRCH
FILEXW\ ,((Proc. G, &LEXW ' HMLHV6\ WW SS 66-

(/0\$ 6 0 \$57,1(= 3 \$ DQ6\$%' (// - 3\$ WDMRUP DMRQ

P HMRGIRUHIXYDQVQIQM DQRS IP S WRXQW J DQ CCIIQV RUV\ ,(((
7UDQ\ &LEXW 6\ WWI, Fundam. 7KHRU\ Appl., &\$ SS

%(576 * : DQ6(' 5\$ \$ 6 3\$ JHQHEDWRI FXUHQW amplifier-
EDMGETXGDUE ICMFILEXW\ ,(((7UDQ&ILFXIW6\ WW Fundam. 7KHRU
Appl., &\$ 6 SS

+, *\$6+, 0 0 35 HD, DMRQRI FXUHQRCHMDQM HUXQFWRQXVQI
RXUMP IQDQVQ nullor," (CHWURQ Lett., SS

6(1 5 32 QHTXYDQMRUP VRI VQI QRS IP S MQXVRIGD&

RHODMUV\ ,(((7UDQ&ILFXIW6\ WW Fundam. 7KHR\ \$SSO &\$6 SS

+8,-6 - + ³² SHDWRQDQDIQ DP SOLHU IEE Proc. &ILFXIW
' HMFH 6\ \S

&5 ³, QMRGXFWRQW' LIIMGLIQDURFHMQI' 1 HZ <RUN : McGraw-
+KDKSWU

5\$7+ 7 6 ³, QYHMFVWHQWZ RUNV (CHWURQ Lett., SS

&,8&\$ ³⁸ VQI nullor IUHDI, DWRQRI IQYHVMQMHIXQFWRQDQG
HKUDFMIWEV' (CHWURQ Lett., SS

&+,3 %DQG685\$. \$0 3217251 : ³⁷ KHP SRUMQFRQGNRQIQ
VHMQRUP DWRQRI YRQW HP RGHQMWFXUHQWRCHQYHVMQMXVQI FTFN,"
((&2 1 KMUTT, %DQNRN7 KDDQG

58721 / 7 ³⁵ &\$&7,9(&,5&8,7 7KRU DQG' HMLQ' 1 HZ -HMH
3UHQM+DQ

6(5 DQGO \$/+275\$ - ³⁰ IQP DQDI, DWRQRI DQWRRI
RSLDWRQDQ IURHGIP SOLHEDMGIQDIQ IP SHDQFH (CHWURQ Lett., SS

