

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Құттыбай Н.Б.

Электроника негіздері

«Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар», «Өндірістік электроника және басқару жүйелері» мамандықтары бойынша білім алушы студенттерге арналған

Алматы

9 Дәріс. Өрістік транзисторлар. Өрістік транзисторлардың түрлері, жұмыс принципі және статикалық сипаттамалары. Вольт-амперлік сипаттамасы.

Дәрістің мақсаты: Өрістік транзисторлардың құрылымын, жұмыс істеу принципін, түрлерін, статикалық және вольт-амперлік сипаттамаларын терең түсіну. Сонымен қатар, олардың практикалық қолдану салаларын қарастыра отырып, өрістік транзисторлардың заманауи электроникадағы маңызын ұғыну.

1. Кіріспе

Өрістік транзисторлар (ӨТ) — бұл токтың басқарылуы электр өрісі арқылы жүзеге асатын жартылай өткізгіш құрылғылар. Олар биполярлы транзисторлардан негізгі айырмашылығы — басқару электр тогы емес, кернеу арқылы жүзеге асады, сондықтан қуат тұтынуы төмен болады.



2. Өрістік транзисторлардың түрлері

Өрістік транзисторлар (ӨТ) — бұл басқару сигналы ретінде ток емес, электр өрісі арқылы әрекет ететін құрылғылар. Олардың түрлері арнаның құрылымына және басқару әдісіне байланысты екі негізгі топқа бөлінеді:

а) Каналы бар өрістік транзисторлар (Junction Field-Effect Transistor, JFET)

Бұл түрдегі транзисторларда өткізгіш арна (канал) құрылғының ішінде өндіріс кезінде алдын ала қалыптасады. Осы арна арқылы негізгі ток өтеді.

1) N-каналды JFET:

- ❖ Бұл құрылғыда негізгі заряд тасымалдаушылар — электрондар.
- ❖ Арна n-типті жартылай өткізгіштен тұрады.
- ❖ Қақпа (Gate) p-типті материалдан жасалып, арнамен pn-контакт арқылы байланысады.
- ❖ Қақпаға теріс кернеу берілген кезде, pn-контакт жабылады және өткізгіш арна тарылып, арна арқылы өтетін ток азаяды.
- ❖ Егер қақпа кернеуі белгілі бір мәннен төмен түссе — транзистор жабылады.

2) P-каналды JFET:

- ❖ Негізгі заряд тасымалдаушылар — тесіктер.
- ❖ Қақпаға оң кернеу берілсе, арна жабыла бастайды.
- ❖ Жұмыс принципі N-каналды түріне ұқсас, бірақ кернеу мен токтың бағыты кері.

Артықшылықтары:

- ❖ Жоғары кіріс кедергісі
- ❖ Қарапайым құрылым
- ❖ Күшейткіштерде жиі қолданылады

б) *Изоляцияланған қақпалы өрістік транзисторлар (MOSFET)*

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) — қазіргі заманғы электроникада кеңінен қолданылатын өрістік транзистордың түрі. Оның негізгі ерекшелігі — қақпа (Gate) мен арна арасында изоляция (әдетте SiO_2) орналасқан. Бұл құрылым кіріс тогының болмауына және энергияны аз тұтынуға мүмкіндік береді.

MOSFET-тің екі негізгі режимі бар:

1. Enhancement (арттырушы) – Арна кернеу берілгенде ғана пайда болады
2. Depletion (азайтушы) – Арна бастапқыда бар, бірақ кернеу арқылы тарылтылады немесе кеңейтіледі

1) N-каналды (Enhancement-mode N-MOSFET)

- ❖ Қалыпты жағдайда арна жоқ, яғни транзистор жабық.
- ❖ Қақпаға оң кернеу бергенде, субстраттағы тесіктер ығысып, электрондар шоғырланып, өткізгіш арна түзіледі.
- ❖ Кернеу артқан сайын, арна кеңейіп, ток артады.

Артықшылықтары:

- ❖ Жоғары жылдамдық
- ❖ Жоғары коммутациялық жиілік

2) P-каналды (Enhancement-mode P-MOSFET)

- ❖ Қақпаға теріс кернеу берілгенде ғана арна пайда болады.
- ❖ Қалған жұмыс принципі N-каналды түріне ұқсас, бірақ заряд тасымалдаушылар — тесіктер.

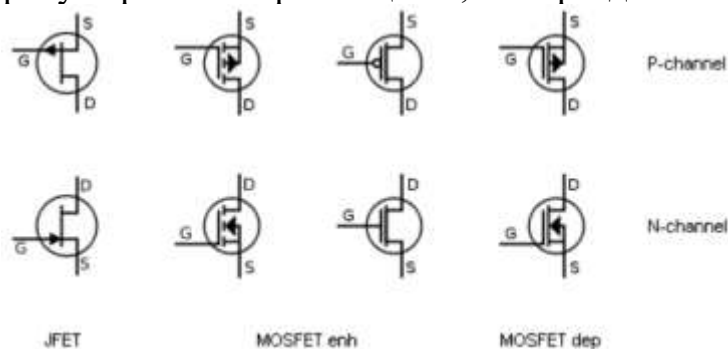
3) N-каналды (Depletion-mode N-MOSFET)

- ❖ Бұл транзисторда өткізгіш арна бастапқыда бар.
- ❖ Қақпаға теріс кернеу берілсе, электрондар ығысып, арна тарылып, ток азаяды.

- ❖ Егер қақпаға оң кернеу берілсе — арна кеңейіп, ток артады.

4) P-каналды (Depletion-mode P-MOSFET)

- ❖ Бастапқыда арна бар.
- ❖ Қақпаға оң кернеу берілсе, арна тарылып, ток азаяды.
- ❖ Теріс кернеу берілсе — арна кеңейіп, ток артады.



3. Жұмыс принципі

Өрістік транзисторлардың (ӨТ) жұмыс істеуінің негізі — электр өрісінің әсерімен арна арқылы өтетін тоқты басқару. Бұл басқару қақпа (Gate) мен кіріс (Source) арасындағы кернеу (U_{GS}) арқылы жүзеге асады.

Яғни, қақпаға берілетін кернеу арқылы транзистор ішіндегі өткізгіш арнаның қасиеттері (кеңдігі, кедергісі) өзгереді, нәтижесінде шығыс арқылы өтетін ток (I_D) басқарылады.

N-каналды өрістік транзистордың жұмыс принципі

1) JFET (каналы бар өрістік транзистор):

- ❖ N-типті арна арқылы электрондар ағыны жүреді.
- ❖ Қақпа (Gate) P-типті жартылай өткізгіштен тұрады, ол арнамен pn-контакт арқылы байланысады.
- ❖ Қақпа мен арна арасындағы кернеу теріс болғанда, pn-контакт кері бағытта кернеу алады.
- ❖ Бұл кезде арна бойында depletion-аймақ пайда болады, ол өткізгіш арнаны тарылтады, нәтижесінде ток азаяды.
- ❖ Қақпа кернеуі белгілі бір теріс мәнге жеткенде (қақпа кесу кернеуі — $U_{GS(off)}$), арна толық жабылады, ток тоқтайды.

2) MOSFET (изоляцияланған қақпалы транзистор):

- ❖ N-каналды энхансмент (арттырушы) MOSFET бастапқыда арнасыз болады.
- ❖ Қақпаға оң кернеу берілгенде, Gate және Substrate (p-типті негіз) арасындағы электр өрісі пайда болады.
- ❖ Бұл өріс негіздегі тесіктерді ығыстырып, электрондарды жинақтайды.
- ❖ Нәтижесінде инверсиялық қабат түзіледі — бұл өткізгіш арна.
- ❖ Кернеу жоғарылаған сайын арна кеңейеді, дренаж тогы (I_D) өседі.

Қақпа ток өткізбейді, өйткені қақпа пен арна арасында SiO_2 изоляторы орналасқан. Яғни, кіріс тогы ≈ 0 , бұл MOSFET-тің энергия үнемдейтін элемент екенін көрсетеді.

P-каналды өрістік транзистордың жұмыс принципі

P-каналды транзисторларда жұмыс принципі N-каналды түрге симметриялы, тек кернеу мен ток бағыттары қарама-қарсы:

- ❖ Қақпаға теріс кернеу берілгенде арна (электрондар ығысып, тесіктер жиналады) қалыптасады немесе кеңейеді.
- ❖ Ток Source-тен Drain-ге бағытталады (электрон ағынына қарама-қарсы — тесіктер ағыны).
- ❖ Кернеу неғұрлым теріс болса, арна соғұрлым жақсы қалыптасады, ток артады.

4. Статикалық сипаттамалары

Өрістік транзистордың статикалық сипаттамалары — бұл құрылғының тұрақты ток пен кернеу режимдеріндегі жұмысын сипаттайтын маңызды графиктер. Бұл сипаттамалар транзистордың басқару қабілетін, ток өткізу мүмкіндігін және жүктемемен өзара әрекетін түсінуге көмектеседі.

ӨТ-тың екі негізгі статикалық сипаттамасы бар:

a) Беріліс сипаттамасы (Transfer Characteristic)

Беріліс сипаттамасы — бұл қақпа мен көз (Gate-Source) арасындағы кернеу U_{GS} өзгерген кезде арнадан өтетін ток I_D -ның қалай өзгередінін көрсететін график:

$$I_D = f(U_{GS})$$

N-каналды транзистор үшін:

- ❖ Қақпаға оң кернеу (U_{GS}) берілгенде, арнада электрондар саны артады, яғни өткізгіштік өседі.
- ❖ Нәтижесінде дренаж тогы I_D артады.
- ❖ Кернеу белгілі бір шекті мәнге (U_{th}) жеткенде ғана ток аға бастайды.
- ❖ Бұл сипаттама әдетте параболалық немесе экспоненциалды сипатта болады.

P-каналды транзистор үшін:

- ❖ Қақпаға теріс кернеу берілгенде ток артады.
- ❖ Симметриялы сипатта, бірақ кернеу мәндері теріс.

Қолдану маңызы:

- ❖ Бұл сипаттама аналогты күшейткіштер, аналогтық басқару және тексеру схемаларын жобалауда маңызды.
- ❖ Мысалы, беріліс сипаттамасы бойынша кіріс кернеуінің өзгерісімен шығу тогының өзгерісін бағалауға болады.

б) Шығыс сипаттамасы (Output Characteristic)

Шығыс сипаттамасы — бұл дренаж-көз (Drain-Source) арасындағы кернеу U_{DS} өзгерген кезде дренаж тогының I_D қалай өзгередінін сипаттайды:

$$I_D = f(U_{DS}) \text{ орнатылған } U_{GS} \text{ кезінде}$$

График үш аймаққа бөлінеді:

1. Омикалық аймақ (линейный режим):

- ❖ Кіші U_{DS} мәндерінде транзистор резистор сияқты жұмыс істейді.
- ❖ I_D ток U_{DS} кернеуіне сызықтық тәуелді.
- ❖ Бұл режимде транзистор тұрақты резистивті жүктеме ретінде қолданылуы мүмкін.

2. Қанығу аймағы (saturation region):

- ❖ U_{DS} жоғарылағанда, бірақ U_{GS} бекітілген мәнден жоғары болса, арна толық қалыптасады.
- ❖ I_D дерлік тұрақты болып қалады (ток өзгермейді).
- ❖ Бұл режимде транзистор ток көзі ретінде жұмыс істейді.
- ❖ Күшейткіштерде дәл осы режим қолданылады.

3. Кесілетін аймақ (cut-off):

- ❖ Егер U_{GS} порог мәнінен төмен болса, арна жоқ, ток жүрмейді ($I_D \approx 0$).
- ❖ Транзистор өшірілген күйде болады.
- ❖ Цифрлық схемаларда логикалық "0" күйіне сәйкес келеді.

Шығыс сипаттаманың маңызы:

- ❖ Бұл сипаттама бойынша транзистордың жүктемемен өзара әрекеттесуі, шығыс қуаты, қанығу режиміндегі тұрақтылығы бағаланады.
- ❖ Қуатты күшейткіштер мен коммутаторлар жасау кезінде жиі қолданылады.

5. Вольт-амперлік сипаттамасы (BAC)

Вольт-амперлік сипаттама (BAC) — бұл өрістік транзистордың электрлік мінез-құлқын сипаттайтын маңызды график. Ол арна арқылы өтетін токтың (I_D), дренаж-көз кернеуіне (U_{DS}) тәуелділігін көрсетеді, әртүрлі қап-көз кернеулері (U_{GS}) кезінде.

Бұл сипаттама транзистордың жұмыс режимдерін анықтауға мүмкіндік береді және құрылғының коммутатор немесе күшейткіш ретінде қалай жұмыс істейтінін көрсетеді.

а) N-каналды MOSFET BAC

1. Басты жұмыс аймақтары:

1.1. Омикалық аймақ (Ohmic region)

- ❖ Бұл аймақ U_{DS} кернеуі аз болған кезде байқалады ($U_{DS} < U_{GS} - U_{th}$).
- ❖ Арна толық ашық, және транзистор резистор сияқты әрекет етеді.
- ❖ Ток пен кернеу арасында сызықтық байланыс бар:

$$I_D \approx k \cdot [(U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - U_{DS}^2 / 2]$$

❖ Бұл режимде транзистор аналогтық реттегіштерде, қуатты басқаруда пайдаланылады.

1.2. Қанығу аймағы (Saturation region / Active region)

❖ U_{DS} кернеуі жоғары, ал $U_{GS} > U_{th}$ болса, арна қалыптасқан, бірақ ары қарайғы U_{DS} ұлғаюы I_D -ға әсер етпейді.

❖ Ток тұрақты болып қалады:

$$I_D = (k \cdot (U_{GS} - U_{th})^2) / 2$$

❖ Бұл аймақта MOSFET күшейткіш ретінде қолданылады.

❖ Қанығу режимі стабилді ток көзі ретінде де маңызды.

1.3. Блоктау аймағы (Cut-off region)

❖ Егер $U_{GS} < U_{th}$ болса, арна қалыптаспайды, яғни транзистор жабық.

❖ Арна арқылы ток өтпейді ($I_D \approx 0$).

❖ Бұл режимде құрылғы өшірулі немесе логикалық "0" күйінде болады.

❖ MOSFET цифрлық коммутатор ретінде дәл осы режимде жұмыс істейді.

б) P-каналды MOSFET BAC

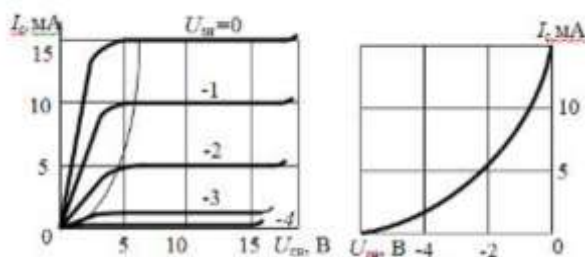
P-каналды MOSFET үшін BAC принципі жағынан ұқсас, бірақ келесі айырмашылықтар бар:

Барлық кернеу мен ток полярлығы — кері бағытта:

❖ U_{GS} — теріс мән

❖ U_{DS} — теріс мән

❖ I_D — теріс ток



6. Қолданылу аймақтары

Өрістік транзисторлар (әсіресе MOSFET түрлері) қазіргі заманғы электроникада өте кең қолданыс тапқан. Олардың жоғары кіріс кедергісі, төмен қуат тұтынуы, жоғары коммутациялық жылдамдығы және кішкентай өлшемдері оларды көптеген салаларда таптырмас етіп отыр.

1. Цифрлық схемаларда

а) Логикалық элементтер

❖ MOSFET-тер интегралдық схемалардағы логикалық элементтерді құру үшін қолданылады: NOT, AND, OR, NAND, NOR т.б.

❖ CMOS технологиясы (Complementary MOS) — ең кең таралған технология, онда бір уақытта N-каналды және P-каналды MOSFET пайдаланылады.

❖ Артықшылығы: өте төмен қуат тұтыну, тек күй өзгерген кезде ғана ток жүреді.

б) Микропроцессорлар мен жедел жад құрылғылары

❖ Процессорлардың ішкі құрылымында миллиондаған MOSFET транзисторлар бар.

❖ Олар логикалық қақпалар, регистрлер, мультиплексорлар және басқа да құрылымдарды қалыптастырады.

❖ Масштабтау мүмкіндігі (нанометрлік деңгейге дейін кішірейту) – осы транзисторлардың басты артықшылығы.

2. Күштік электроникада

а) Қуатты MOSFET транзисторлар (Power MOSFETs)

❖ Жоғары ток пен кернеуді коммутировать ету үшін пайдаланылады.

❖ Қуатты MOSFET-тер жоғары жылдамдықпен ашылып-жабылады, бұл оларды импульстік режимде тиімді пайдалануға мүмкіндік береді.

б) Инверторлар

❖ MOSFET-тер инвертор схемаларында (DC–AC түрлендіргіштер) кеңінен қолданылады.

❖ Фотолютациялық жүйелерде, күн панельдерінің контроллерлерінде, айнымалы ток қозғалтқыштарын басқаруда қолданылады.

в) Коммутациялық құрылғылар

❖ MOSFET-тер коммутаторлар, жоғары жиілікті импульстік генераторлар, айнымалы кернеу реттегіштерінде қолданылады.

❖ Олар релелерді, механикалық қосқыштарды алмастыра алады.

3. Күшейткіштерде

а) Аудио күшейткіштер

❖ MOSFET-терді сызықтық режимде жұмыс істетуге арқылы жоғары сапалы аудио күшейткіштер жасауға болады.

❖ Олар төмен шу, жақсы жиілік сипаттамалары және жоғары кіріс кедергісімен ерекшеленеді.

б) Радио жиілікті күшейткіштер

❖ Жоғары жиілікті өрістік транзисторлар радиоқабылдағыштар мен таратқыштарда қолданылады.

❖ Олар үлкен жиілік диапазонында тұрақты жұмыс істей алады.

в) Импульстік күшейткіштер

❖ MOSFET-тер импульстік (цифрлық) күшейткіштерде (мысалы, классы D аудио күшейткіштерде) пайдаланылады, себебі олар өте жоғары тиімділікке (90–95%) қол жеткізе алады.

Қорытынды:

Өрістік транзисторлар — қазіргі электрониканың ең маңызды және кең таралған элементтерінің бірі. Олардың жұмыс принципі электр өрісі арқылы арна тогын басқаруға негізделеді, бұл құрылымның қарапайымдылығы мен тиімділігін қамтамасыз етеді. Жоғары кіріс кедергісі, аз қуат тұтынуы және жоғары коммутациялық жылдамдық — өрістік транзисторлардың негізгі артықшылықтары болып табылады.

Түрлеріне байланысты, өрістік транзисторлар әртүрлі қолдану салаларында пайдаланылады:

— N- және P-каналды арналы транзисторлар аналогты күшейткіштер мен басқару тізбектерінде кең қолданылады;

— MOSFET транзисторлары жоғары жылдамдықты цифрлық схемаларда, қуатты түрлендіргіштер мен инверторларда қолданылады.

Статикалық және вольт-амперлік сипаттамаларын зерттеу арқылы бұл элементтердің қалай жұмыс істейтінін, қандай режимдерде (қанығу, сызықты, блоктау) қолдануға болатынын терең түсінуге болады.

Өрістік транзисторларды меңгеру — заманауи электроника мен автоматтандырылған жүйелерді жобалау үшін маңызды қадам. Бұл тақырып алдағы уақытта да түрлі инновациялық құрылғылар мен технологиялардың негізі бола береді.

Әдебиеттер тізімі:

1. Стефанович, В. Я. "Электроника: Учебник для вузов" – Москва: Высшая школа, 2005.
2. Мягков, Ю. Н., Петров, А. А. "Основы электроники и микроэлектроники" – СПб.: Питер, 2010.
3. Sedra, A. S., Smith, K. C. "Microelectronic Circuits" – Oxford University Press, 2020.
4. Tocci, R., Widmer, N., Moss, G. "Digital Systems: Principles and Applications" – Pearson, 2017.
5. Базарбаев Н. Б., Бегімбеков А. Ж. "Электроника және микропроцессорлық техника негіздері" – Алматы: КазНТУ, 2013.
6. Хамитов, Ш. М. "Электроника негіздері" – Алматы: Білім, 2011.
7. Глазунов В. В., Павлов С. И. "Электронные приборы и устройства" – М.: Радио и связь, 2004.
8. Millman, J., Halkias, C. C. "Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems" – McGraw-Hill, 1991.
9. Floyd, T. L. "Electronic Devices" – Pearson Education, 2019.
10. Бейсебеков, Қ. Е. "Электротехника және электроника негіздері" – Алматы: Эверо, 2016.