

**Шугаман хугацаа-инвариант  
систем**

Нэр: \_\_\_\_\_

Анги: \_\_\_\_\_

Огноо: YYYY / MM / DD

Дүн: A | B     $\Sigma$  =

Шалгасан: \_\_\_\_\_

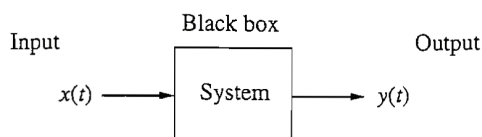
## 1 Зорилго

Энэхүү лабораторийн ажлаар Шугаман хугацаа-инвариант систем тэр дундаа нам давтамжийн шүүлтүүр (интегралчлагч RC хэлхээ), өндөр давтамжийн шүүлтүүр (дифференциалчлагч RC хэлхээ)-ий давтамжийн тодорхойлогч болон импульс респонс, *step* респонсийг олж системд анализ хийж сурна.

## 2 Онолын үндэс

### LTI системүүдийн респонс

Зураг (1)-т гадны оролтын дохио  $x(t)$  болон гаралтын дохио  $y(t)$ -тэй хар хайрцгаар дүрсэлсэн системийг дүрсэлжээ. Цахилгаан холбоонд тухайн систем нь ихэвчлэн хоёр порттой сүлжээ байдаг ба энэ нь оролтын портныхоо гүйдэл эсвэл хүчдэлээр удирдагддаг байна. Харин үр дүн нь гаралтын порт дээрх өөр нэгэн гүйдэл эсвэл хүчдэлээр илэрхийлэгдэнэ. Энерги хадгалдаг элементүүд болон бусад дотоод нөлөөллүүдээс шалтгаалж гаралтын дохионы хэлбэр нь оролтын дохионы хэлбэрээс өөр байдаг байна. Харин хар хайрцганд юу байгаа бол? Тухайн систем нь оролт болон гаралтын өдөөлт – респонс буюу *excitation* – *response*-ийн хоорондын хамаарлаар тодорхойлогддог байна.



Зураг 1

Энэ бүлэгт бид шугаман хугацаанаас – хамааралгүй буюу *linear time – invariant* /товчоор **LTI** систем гэж нэрлэдэг/ системүүдийн онцгой боловч чухал ангилалыг авч үзэх юм. Бид хугацааны домайн дээрх оролт – гаралтын харилцан хамаарлыг суперпозицын интеграл ашиглан хөгжүүлэх боломжтой ба мөн системүүдийн импульсын респонс буюу *impulse response*-ийг хөгжүүлэх юм. Үүний дараа бид системийн дамжууллын функцээр илэрхийлэгдэх давтамжийн домайн дээр анализ хийх юм.

### Импульс респонс болон Суперпозицын интеграл

Зураг (1)-д үзүүлсэн **LTI** систем нь хугацаан дээрх оролтын дохио  $x(t)$ -ийн хувьд энерги хадгалагдах дотоод элементгүй байх юм. Гаралтын дохио  $y(t)$  нь албадсан респонс буюу *forced response* болох ба  $x(t)$ -с шалтгаалж дараах байдлаар илэрхийлэгдэх юм.

$$y(t) = F[x(t)] \quad (1)$$

Дээрх тэгшитгэлийн  $F[x(t)]$  нь оролт болон гаралтын хоорондын функциональ хамаарал юм. Үүний шугаман гэдэг шинж чанар нь Тэгшитгэл (1)-р тодорхойлогдох ба Тэгшитгэл (1) нь суперпозицын зарчмыг дагадаг байна. Тиймээс

$$x(t) = \sum_k a_k x_k(t) \quad (2)$$

байх бөгөөд үүнд  $-$ ууд нь тогтмолууд байх бөгөөд ингэснээр дараах хэлбэртэй болох юм. Үүнд:

$$y(t) = \sum_k a_k F[x_k(t)] \quad (3)$$

Хугацаанаас – хамааралгүй буюу **time – invariance** шинж чанар гэдэг нь системийн характеристикүүд нь хугацааны хувьд тогтмол үлдэх шинж чанар юм. Тиймээс хугацааны хувьд шилжилт хийсэн оролтын  $x(t - t_d)$  дохио нь дараах байдлаар илэрхийлэгдэнэ.

$$F[x(t - t_d)] = y(t - t_d) \quad (4)$$

Ингэснээр гаралт нь хугацааны хувьд шилжсэн болох ба эсрэг тохиолдолд өөрчлөгдөхгүй. Оролт-гаралтын ойлгомжтой тэгшитгэлийг гарган авахын тулд бид нэгдүгээрт системийн **импульс респонсыг** тодорхойлох ёстой.

$$h(t) \triangleq F[\delta(t)] \quad (5)$$

$x(t) = \delta(t)$  үед дээрх тэгшитгэл нь *forced response*-той тэнцүү байх юм. Гэхдээ дурын тасралтгүй оролтын дохио нь  $x(t) = x(t) * \delta(t)$  гэсэн конволюц хэлбэртэйгээр бичигдэх боломжтой. Тиймээс дараах хэлбэртэй тэгшитгэлийг бичиж болох ба

$$\begin{aligned} y(t) &= F \left[ \int_{-\infty}^{\infty} x(\lambda) \delta(t - \lambda) d\lambda \right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(\lambda) F[\delta(t - \lambda)] d\lambda \end{aligned}$$

энэхүү тэгшитгэлийн операторуудын байр солилт нь системийн шугаман байдлын давуу тал болох юм. Харин хугацаанаас-хамаардаггүй шинж чанараас  $F[\delta(t - \lambda)] = h(t - \lambda)$  хэлбэртэй тэгшитгэлийг гарган авах ба үүний үр дүнд доорх тэгшитгэлүүдийг бичих боломжтой юм. Үүнд:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\lambda) h(t - \lambda) d\lambda \quad (6a)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} h(\lambda) x(t - \lambda) d\lambda \quad (6b)$$

байх бөгөөд дээрх тэгшитгэлийг бид конволюцын байр солилтын буюу *commutative* шинж чанарыг ашиглан бичсэн болно.

Дифференциал тэгшитгэл эсвэл зарим бусад системийн загвараас  $h(t)$ -г тодорхойлох олон аргууд оршин байдаг байна. Гэхдээ  $x(t) = u(t)$  гэж авах мөн системийн алхмын респонс буюу **step response**-г бодох нь илүү хялбархан байх бөгөөд дараах тэгшитгэлийг бичиж болох юм.

$$g(t) = F[u(t)] \quad (7)$$

тэгшитгэлээс дараах тэгшитгэлийг бичиж болно.

$$h(t) = \frac{dg(t)}{dt} \quad (8)$$

Импульсын болон алхмын респонсуудын хоорондын хамаарлын энэхүү уламжлал нь конволюцын ерөнхий шинж чанарыг дагадаг ба дараах хэлбэртэй бичигдэх юм.

$$\frac{d}{dt}[v * \omega(t)] = v(t) * \left[ \frac{d\omega(t)}{dt} \right]$$

Тодорхойлолтын дагуу  $g(t) = h * u(t)$  учраас үүний үр дүнд  $dg(t)/dt = h(t) * [du(t)/dt] = h(t) * \delta(t) = h(t)$  хэлбртэй болох юм.

### 1-р эрэмбийн системийн хугацааны респонс

### Жишээ 1

Зураг (2)-т хялбар  $RC$  хэлхээг харуулсан ба энэ нь хоёр порттой буюу оролтын хүчдэл  $x(t)$  болон гаралтын хүчдэл  $y(t)$ -тэй хэлхээ юм. Харьцуулах хүчдэлийн туйлууд нь  $+/-$  тэмдгээр илэрхийлэгдэх ба энд илүү өндөр потенциалтай хүчдэл нь  $+$  тэмдгээр илэрхийлэгдэнэ гэж үзнэ. Энэхүү хэлхээ нь дифференциал тэгшитгэлээр удирдагддаг 1-р эрэмбийн тэгшитгэл юм.

$$RC \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

Тестэй илэрхийллүүд нь тодорхой дамжууллын шугамууд болон кабелиудыг дүрсэлдэг ба иймээс бид системийн респонсыг дэлгэрэнгүй судлаж үзэх хэрэгтэй юм. Дифференциал тэгшитгэлээс эсвэл хэлхээний диаграмаас алхмын респонс нь хялбараар олдох бөгөөд дараах тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэх юм.

$$g(t) = (1 - e^{-t/RC})u(t) \quad (9)$$

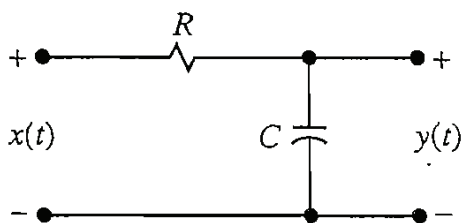
Физик процессыг нь авч үзвэл, конденсатор нь анхандаа 0 хүчдэлээс эхлэх бөгөөд  $x(t) = u(t)$  үед хугацааны тогтмол  $RC$ -ээр  $y(\infty) = 1$  хуулиар цэнэглэгдэнэ. Зураг (3a)-д энэхүү үйл явцыг дүрслэн харуулсан байна. Харин Зураг (3b)-д  $g(t)$ -г дифференциалчлалж гаргаж авсан үүнтэй нийцэх импульсын респонсыг харуулжээ.

$$h(t) = \frac{1}{RC} e^{-t/RC} u(t) \quad (10)$$

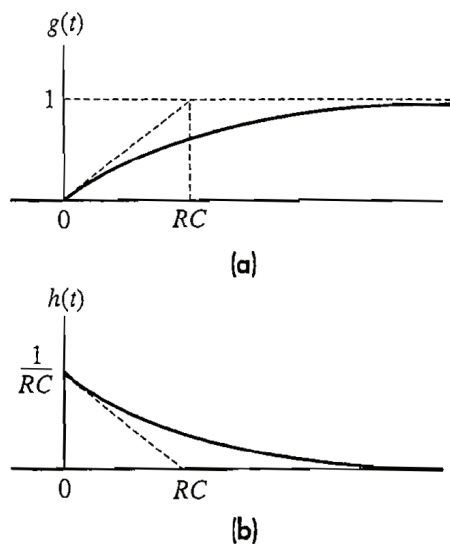
$t < 0$  агшнуудад оролт нь 0-тэй тэнцүү учир  $g(t)$  болон  $h(t)$  нь *causal* буюу шалтгаант дохионууд байх юм. Тэгшитгэл (10)-г суперпозицын интегралд оруулж ирснээр дурын  $x(t)$  оролтын респонс олдох боломжтой юм. Жишээ нь  $t = 0$  агшин дахь тэгш өнцөгт пульсын нөхцлийг авч үзье. Ингэснээр  $0 < t < \tau$  агшинд  $x(t) = A$  болох юм.  $y(t) = h * x(t)$  конволюц нь 3 хэсэгт хуваагдана.

$\tau/RC$ -н 3 утгуудад Зураг (4)-д дүрслэгдсэн шиг үр дүнтэй Зураг (2.4-1)-д үзүүлсэн жишээ шиг 3 хэсэгт хуваагдах юм. Үүнийг дараах тэгшитгэлд харуулав.

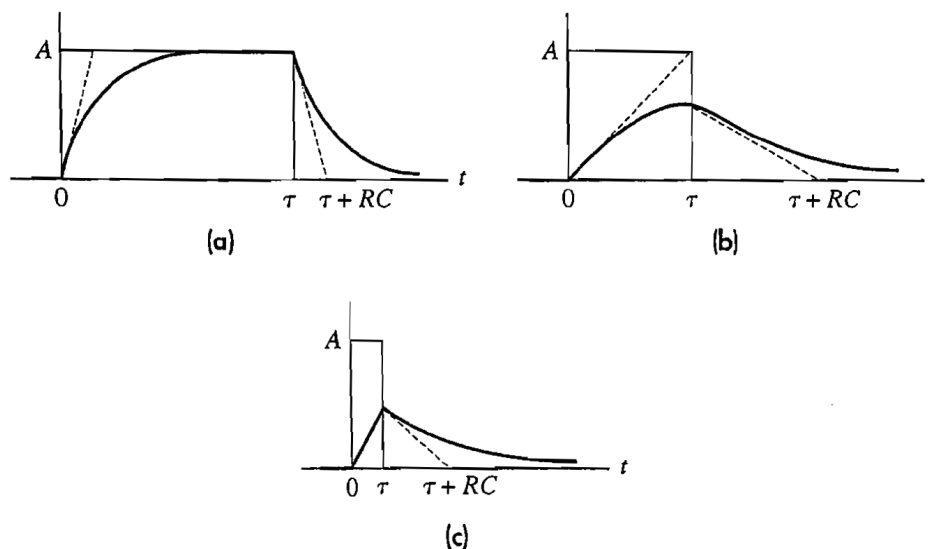
$$y(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A(1 - e^{-t/RC}) & 0 < t < \tau \\ A(1 - e^{-t/RC})e^{-(t-\tau)/RC} & t > \tau \end{cases} \quad (11)$$



Зураг 2: RC нам давтамжийн шүүлтүүр



Зураг 3:  $RC$  нам давтамжийн шүүлтүүрийн гаралт (a) Алхмын /Step/ респонс (b) Импульс респонс



Зураг 4:  $RC$  нам давтамжийн шүүлтүүрийн тэгш өнцөгт импульсын респонс (a)  $\tau \gg RC$  (b)  $\tau \approx RC$  с.  $\tau \ll RC$

#### Дамжууллын функцууд болон давтамжийн респонс

Дээд эрэмбийн системүүдийн хувьд хугацааны домайны анализ нь улам хэцүү болох бөгөөд мөн математикийн хувьд төвөгтэй ойлгомжгүй байдалд шилжих юм. Эхлээд бид импульс респонсын Фурье хувиргалтынх болох системийн дамжууллын функцыг тодорхойлох хэрэгтэй. Үүнийг доорх тэгшитгэлээр харуулав.

$$H(f) \triangleq \mathcal{F}[h(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (12)$$

Энэхүү тодорхойлолт нь хамгийн багадаа хязгаарын утганд  $H(f)$  оршин байхыг шаарддаг. *Unstable* буюу тогтворгүй системийн нөхцөлд  $h(t)$  нь хугацаагаар өсөх ба  $H(f)$  нь оршин байхгүй болно.  $h(t)$  нь бодит хугацааны функц үед  $H(f)$  нь *hermit* тэгш хэмтэй байх юм.

$$H(-f) = H^*(f) \quad (13)$$

Ийм учир дараах хэлбэртэй тэгшитгэл бичигдэнэ.

$$|H(-f)| = |H(f)| \quad \arg H(-f) = -\arg H(f) \quad (14)$$

$x(t)$  дохиог  $X(f)$  спектртэй дурын дохио гэж үзье. Конволюцын теоремыг ашиглан дуудвал,  $y(t) = h * x(t)$ -н хувиргалтыг дараах хэлбэртэйгээр олох боломжтой юм.

$$Y(f) = H(f) X(f) \quad (15)$$

Энэхүү хялбар үр дүн нь системийн давтамжийн домайны анализын суурь ойлголтыг тодорхойлдог. Энэхүү тодорхойлолтоор:

Гаралтын спектр  $Y(f)$  нь оролтын спектр  $X(f)$ -г дамжууллын функц  $H(f)$ -ээр үржүүлсэн үржвэртэй тэнцүү байна.

Тохиромжтой далайцын болон фазын спектрүүд нь тус тус дараах хэлбэртэй байна. Үүнд:

$$|Y(f)| = |H(f)||X(f)|$$

$$\arg Y(f) = \arg H(f) + \arg X(f)$$

хэлбэртэй байх бөгөөд эдгээр нь нэг-давтамжийн буюу *single-frequency* илэрхийлэлтэй харьцуулагддаг.

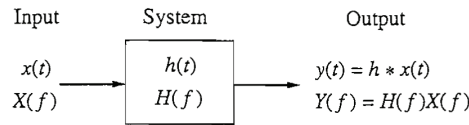
Хэрвээ  $x(t)$  нь энергийн дохио бол  $y(t)$  нь энергийн дохио байх бөгөөд үүний спектрал нягт болон нийт энерги нь дараах тэгшитгэлүүдээр илэрхийлэгдэх бөгөөд эдгээр тэгшитгэлүүд нь Релэйн энергийн теоремын дагуу бичигдэх юм.

$$|Y(f)|^2 = |H(f)|^2 |X(f)|^2 \quad (16a)$$

$$E_y = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 |X(f)|^2 df \quad (16b)$$

Зураг (5)-д манай оролт-гаралтын хамаарлуудыг хоёр домайн дээр аль алинд нь нэгтгэн харуулна. Тодруулбал,  $H(f)$  болон  $X(f)$  нь тус тус өгөгдсөн үед гаралтын дохио  $y(t)$ -г олохоос гаралтын спектр  $Y(f)$ -г олох нь илүү хялбар байх юм. Энэ зарчимд тулгуурлан бид  $y(t)$ -г урвуу хувиргалтаас нь тооцоолох боломжтой бөгөөд үүнийг дараах тэгшитгэлээр харуулж байна.

$$y(t) = \mathcal{F}^{-1} [H(f) X(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) X(f) e^{j2\pi ft} df$$



Зураг 5: LTI системийн оролт-гаралтын хамаарал

## 1-р эрэмбийн системийн давтамжийн респонс

## Жишээ 2

Жишээ (1)-н  $RC$  хэлхээ нь  $Z_R = R$  болон  $Z_C = 1/j\omega C$  гэсэн импедансуудтай элементүүдээр солигдон Зураг (6а)-д шинэчлэгдэн зурагдсан байна.  $x(t) = e^{j\omega t}$  үед  $y(t)/x(t) = Z_C/(Z_C + Z_R)$  байдаг учраас дараах хэлбэртэй тэгшитгэлүүдийг бичих боломжтой юм.

$$\begin{aligned} H(f) &= \frac{(1/j2\pi fC)}{(1/j2\pi fC) + R} = \frac{1}{1 + j2\pi fRC} \\ &= \frac{1}{1 + j(f/B)} \end{aligned} \quad (17)$$

Энд бид системийн параметрыг дараах хэлбэртэй бичнэ.

$$B \triangleq \frac{1}{2\pi RC} \quad (18)$$

Үүнтэй ижил үр дүнгүүдийг  $H(f) = \mathcal{F}[h(t)]$  илэрхийллээс тус тус гарган авах боломжтой. /Системийн импульс респонс нь Жишээ (2)-т үзүүлсэн *causal* буюу шалтгаант экспоненциал пульстэй ижил хэлбэртэй байх юм./ Далайцын харьцаа болон фазын шилжилт нь тус бүр дараах тэгшитгэлүүдээр илэрхийлэгдэх бөгөөд эдгээр нь Зураг (6б)-д  $f \geq 0$  утганд дүрсэлсэн шиг байна.

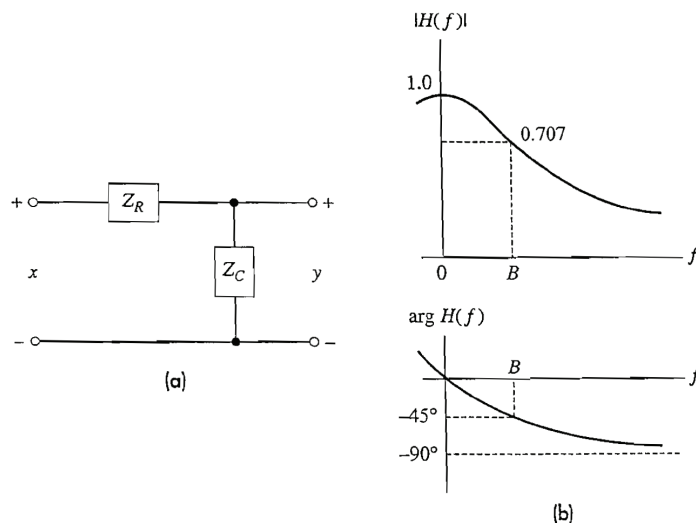
$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/B)^2}} \quad \arg H(f) = -\arctan \frac{f}{B} \quad (19)$$

*Hermit* тэгш хэмтэй шинж чанар нь бидэнд мэдээллийн алдагдалгүйгээр  $f < 0$ -г хасах боломжийг олгох юм. Далайцын харьцаа  $|H(f)|$  нь системийн ямар нэгэн давтамж-сонгох буюу *frequency-selective* шинж чанаруудад онцгой ач холбогдолтой хамааралтай байдаг байна. Энэхүү онцгой системийг бид **нам давтамжийн шүүлтүүр** гэж нэрлэдэг ба учир нь энэ нь нам давтамжтай байгуулагчдын далайцад бараг л нөлөө үзүүлдэггүй бөгөөд үүнийг  $|f| \ll B$  гэж хэлж болох юм. Харин энэхүү шүүлтүүр нь өндөр давтамжтай байгуулагчдын далайцыг огцом багасгадаг бөгөөд үүнийг  $|f| \gg B$  гэж хэлж болох юм. Шүүлтүүрийн нэвтрүүлэх зурвас буюу **passband** эсвэл зурвасын өргөн буюу **bandwidth**-г хэмжсэнээр  $B$  параметрийг тодорхойлох юм.

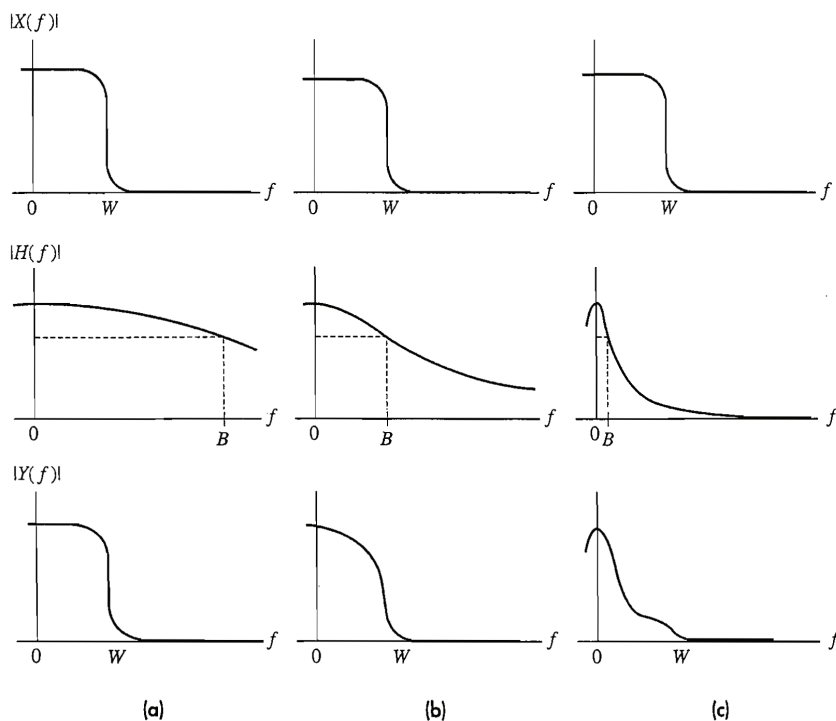
Давтамжийн домайны анализтай хир хол явж чадахыг тайлбарлая.  $x(t)$  нь дурын оролтын дохио байх бөгөөд үүний спектрийн эзлэх хувь нь  $|f| > W$  мужид маш бага байх юм.  $B$  болон  $W$ -н харьцангуй утгуудаас хамаарч авч үзэх боломжтой 3 нөхцлийг бичиж болох юм. Эдгээрт:

1. Зураг (7a)-д үзүүлсэн шиг  $W \ll B$  байх үед дохионы давтамжийн муж болох  $|f| < W$  мужийн турш  $\arg H(f) \approx 0$  мөн  $|H(f)| \approx 1$  байх юм. Тиймээс  $Y(f) = H(f) X(f) \approx X(f)$  мөн  $y(t) \approx x(t)$  байх бөгөөд ингэснээр бидэнд шүүлтүүрээр нэвтрэхдээ гаждаггүй дамжуулал буюу **undistorted transmission** бий болох юм.

2. Зураг (7b)-д үзүүлсэн шиг  $W \approx B$  байх үед  $Y(f)$  нь  $H(f)$  болон  $X(f)$ -с аль алинаас нь хамаардаг байна.  $y(t)$  нь  $x(t)$ -с нэлээд ялгаатай учраас бид гаралт нь гажсан буюу **distorted** гэж хэлж чадна. Гэхдээ хугацааны домайны тооцооллууд нь бодит дохиог олохын тулд шаардагдах юм.



Зураг 6:  $RC$  нам давтамжийн шүүлтүүр (a) хэлхээ (b) дамжууллын функц



Зураг 7: 1-р эрэмбийн нам давтамжийн шүүлтүүрийн давтамжийн домайны анализууд. (a)  $B \gg W$  (b)  $B \approx W$  (c)  $B \ll W$

3. Зураг (7c)-д үзүүлсэн шиг  $W \gg B$  байх үед  $|f| < B$  утганд оролтын спектр нь бараг тогтмол утгатай буюу  $X(0)$  байх ба ингэснээр  $Y(f) \approx X(0) H(f)$  болох юм. Иймээс  $y(t) \approx X(0) h(t)$  болох

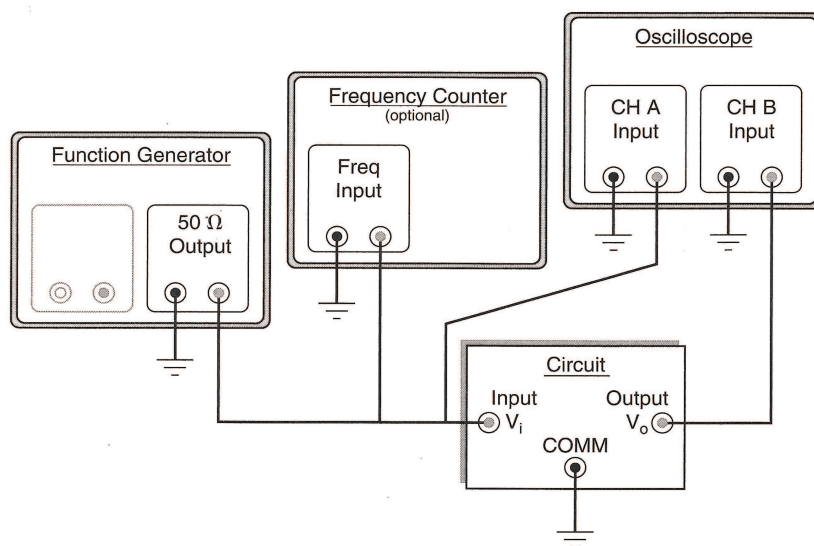
ба мөн гаралтын дохио нь шүүлтүүрийн импульс респонс шиг харагдах юм. Энэхүү нөхцлийг дагаснаар бид оролтын дохиог үндэслэлтэйгээр импульс шиг загварчлах боломжтой болж байгаа юм.

Пульсын өргөний *nominal* спектрал нь  $W = 1/\tau$  байх учраас оролтын тэгш өнцөгт пульстэй манай өмнөх хугацааны домайны анализ нь эдгээр дүгнэлтүүдийг баталж байгаа юм. Тиймээс  $W \ll B$  нөхцөл нь  $1/\tau \ll 1/2\pi RC$ -тэй эсвэл  $\tau/RC \gg 1$ -тэй зохицох ба  $y(t) \approx x(t)$  гэдгийг бид Зураг (4a)-с харах боломжтой юм. Эсрэгээр,  $W \gg B$  нь  $\tau/RC \ll 1$ -тэй Зураг (4c) шиг зохицох бөгөөд энэ зурганд  $y(t)$  нь  $h(t)$ -тэй илүү адилхан харагдах юм.

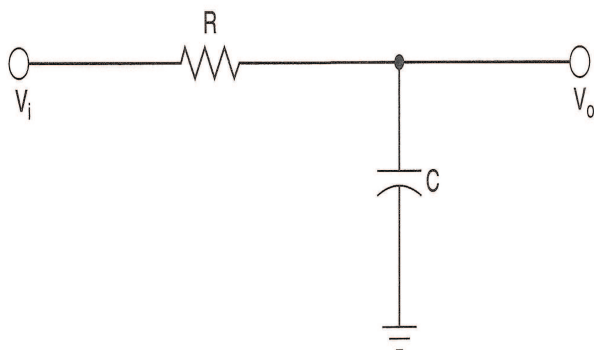
### 3 Гүйцэтгэх ажлууд

Ашиглах тоног төхөөрөмж:

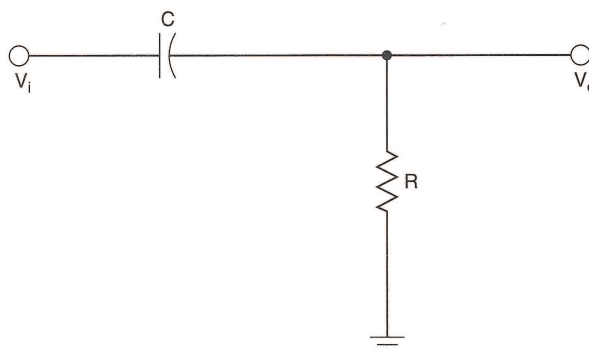
- 1 Функцийн генератор
- 1 Хоёр шугамтай осциллоскоп
- 1 Давтамжийн тоолуур (сонгох боломжтой)



Зураг 8



Зураг 9



Зураг 10

## Нам давтамжийн шүүлтүүр (Интегралчлагч $RC$ хэлхээ)

- 3.1 Зураг (9)-т үзүүлсэн хэлхээг угсар. Зураг (8)-т үзүүлсэн шиг функцийн генератор болон осциллоскопыг хооронд нь холбо.
- 3.2 Үр дүнгийн хуудсан дээр байгаа Хүснэгт (1)-ийн тэмдэглэгээ тус бүр дээр функцийн генераторыг өгөгдсөн давтамж дээр нь мөн гаралтын хүчдэлийг  $10 V_{p-p}$  болгож тохируул.  $V_{out}$  -н *peak-to-peak* утгыг хэмжин тэмдэглэж ав.
- 3.3  $V_{out}$  -н максимум утгыг Хүснэгт (1)-д байгаа өгөгдлөөс тодорхойлно уу. Энэхүү утгаа Хүснэгт (1)-д байгаа бусад бүх  $V_{out}$  -н утгуудыг тэдгээрийн тохиромжтой  $dB$  -н түвшинрүү хөрвүүлэхэд  $0 dB$  -н төвшин болгон ашиглана уу. Гарсан үр дүнгүүдээ Зураг (11)-н *semilog* графикт дүрсэлнэ үү.
- 3.4 Зураг (9)-д үзүүлсэн  $R$  болон  $C$  -н утгуудын дагуу *cutoff* давтамжийг буюу  $f_{co}$  -г тооцоол. Өөрийн график дээр байгаа өгөгдлөөс *cutoff* давтамжийг үнэл. Өөрийн утгуудаа үр дүнгийн хуудсан дээр харуул.
- 3.5 Энэхүү хэлхээний хувьд гаралтын максимум хүчдэлийг  $0.707$  -р үржсэн  $-3 dB$  хүчдэлийн төвшинг тодорхойл. Энэхүү утгаа үр дүнгийн хуудсан дээр тэмдэглэ. Хэлхээний оролтонд өгч байгаа  $V_{in}$  хүчдэлийн утга нь  $10 V_{p-p}$  хэмжээтэй хэвээр байгаа эсэхийг шалга. Мөн давтамжийг бодит *cutoff* давтамж /өмнөх хэсгийн энэхүү даалгаварт таны бодож гаргасан  $V_{out}$  хүчдэл дээрх цэгрүү/ болгон тохируул. Энэхүү давтамжаа хэмжсэн *cutoff* давтамж болгон тэмдэглэ.

## Үр дүнгийн хуудас

Алхам 1

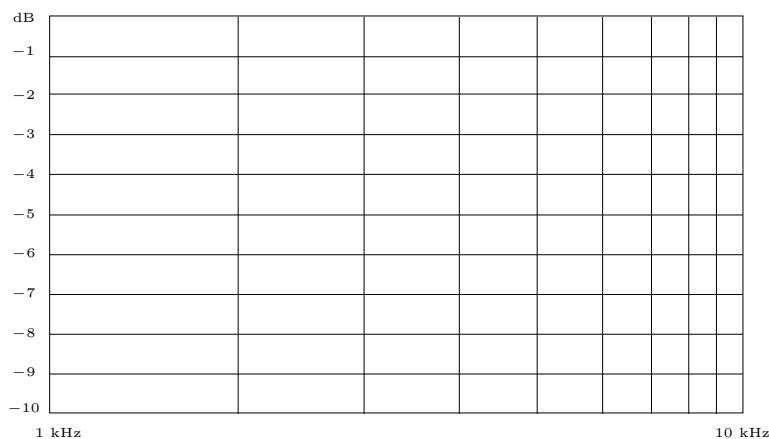
Тооцоолсон  $f_{co}$  .....  
 Ойролцоолсон  $f_{co}$  .....

Алхам 2

$-3 dB$  үед  $V_{out} =$  .....  
 Хэмжсэн  $f_{co} =$  .....

f (kHz)	$v_o$ ( $V_{p-p}$ )	$v_o/v_i$	$20\log(v_o/v_i)$ (dB)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

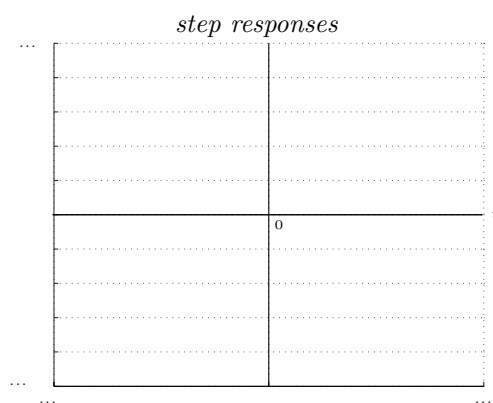
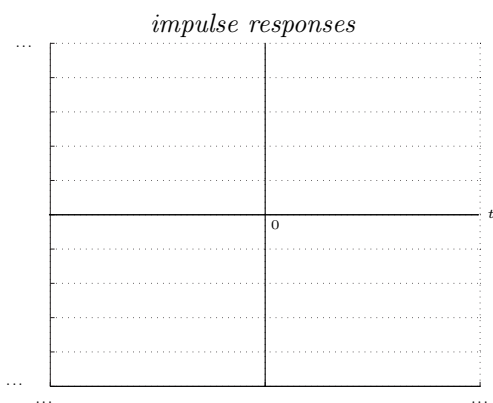
Хүснэгт 1



Зураг 11



- 3.6 Зураг (9)-т үзүүлсэн хэлхээний оролтонд үелсэн тэгш өнцөгт дохио өгөөд гаралтын дохио гурвалжин хэлбэртэй болох хүртэл нь давтамжийг өөрчил. Энэ үеийн давтамж, гурвалжин хэлбэрийн дохионы өсөх, буурч эхлэх үеийн болон дундаж утгуудыг хэмжиж ав.
- 3.7 Мөн тэгш өнцөгт дохионы тэгш хэмийг өөрчилж хэмжилтийг давт. Гаралтын дохионд ямар өөрчлөлт гарч байна вэ?
- 3.8 Тэгш өнцөгт гурвалжин болох үеийн давтамж, гурвалжин хэлбэрийн дохионы өсөх, буурч эхлэх үеийн болон дундаж утгуудыг тооцоолох томъёог гарга. Тэгш өнцөгт яагаад гурвалжин хэлбэртэй болсныг тайлбарла. Энэ хэлхээ идеал интегралчлагчаас ямар ялгаатай вэ?
- 3.9 Зураг (9)-т үзүүлсэн ШХИ системүүдийн импульсийн ба шилжилтийн тодорхойлогчдыг (*impulse and step responses*) тооцоолж зур.



- 3.10 Зураг (9)-т үзүүлсэн хэлхээгээр нэвтрэхдээ чадал нь хоёр дахин буурсан байх синусоидын давтамж  $B$ -г ол. Үүний тулд давтамжийг аажим өөрчлөн гаралтын дохиог хэмжих замаар  $B$ -г олно.

### Өндөр давтамжийн шүүлтүүр (Дифференциалчлагч $RC$ хэлхээ)

- 3.11 Зураг (10)-т үзүүлсэн хэлхээг угсар. Энэхүү даалгаврын өмнөх хэсгүүдэд үзүүлсэн шиг /Зураг (8)-т үзүүлсэн шиг/ функцийг генератор болон осциллоскопыг хооронд нь холбо.

- 3.12 Хүснэгт (2)-ийн тэмдэглэгээ тус бүр дээр функцийн генераторыг өгөгдсөн давтамж дээр нь тохируул.  $V_{in}$  -н утга нь  $10 V_{p-p}$  хэмжээтэй байгаа эсэхийг давхар шалгана уу. Мөн  $V_{out}$  -н *peak-to-peak* утгыг тэмдэглэж ав.
- 3.13  $V_{out}$ -н максимум утгыг Хүснэгт (2)-д байгаа өгөгдлөөс тодорхойлно уу. Энэхүү утгаа хүснэгтэнд байгаа бусад бүх  $V_{out}$  -н утгуудыг тэдгээрийн тохиромжтой  $dB$  -н түвшинрүү хөрвүүлэхэд  $0 dB$  -н төвшин болгон ашиглана уу. Гарсан үр дүнгүүдээ Зураг (12)-н *semilog* графикт дүрсэлнэ үү.
- 3.14 Энэ хэлхээн дэх  $R$  болон  $C$  -н утгуудын дагуу *cutoff* давтамжийг буюу  $f_{co}$  -г тооцоол. Графикаас *cutoff* давтамжийг үнэл. Эдгээр утгуудаа үр дүнгийн хуудсан дээр тэмдэглэ.
- 3.15  $-3 dB$  хүчдэлийн төвшинг энэхүү хэлхээний хувьд 3.5-р даалгаварт хийсэн шиг тодорхойл. Энэхүү утгаа үр дүнгийн хуудсан дээр тэмдэглэ. Хэлхээний оролтонд өгч байгаа  $V_{in}$  хүчдэлийн утга нь  $10 V_{p-p}$  хэмжээтэй хэвээр байгаа эсэхийг шалга. Мөн давтамжийг бодит *cutoff* давтамж /өмнөх хэсгийн энэхүү даалгавар дээр таны бодож гаргасан  $V_{out}$  хүчдэл дээрх цэгрүү/ болгон тохируул. Энэхүү давтамжаа хэмжсэн *cutoff* давтамж болгон тэмдэглэ.

## Үр дүнгийн хуудас

Алхам 1

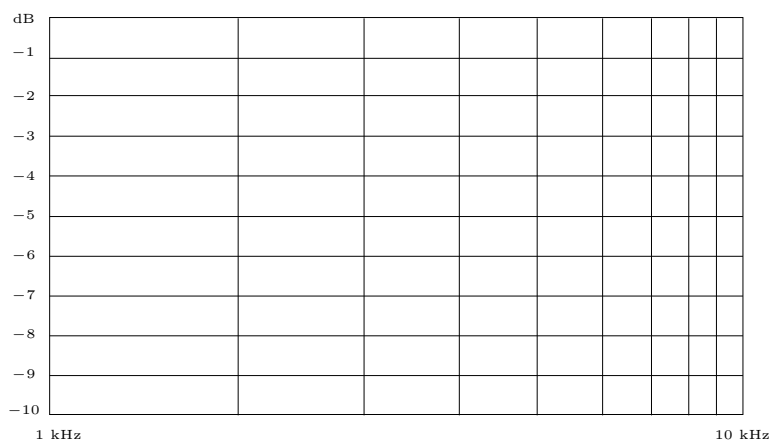
Тооцоолсон  $f_{co}$  .....  
Ойролцоолсон  $f_{co}$  .....

Алхам 2

$-3 dB$  үед  $V_{out} =$  .....  
Хэмжсэн  $f_{co} =$  .....

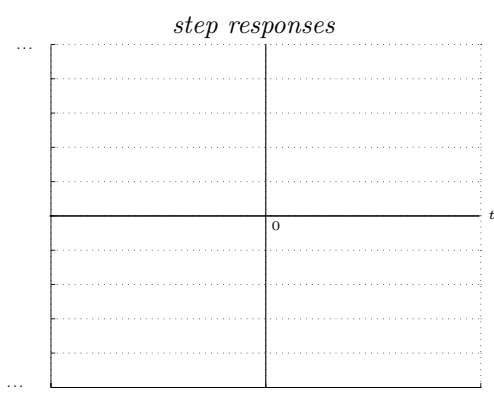
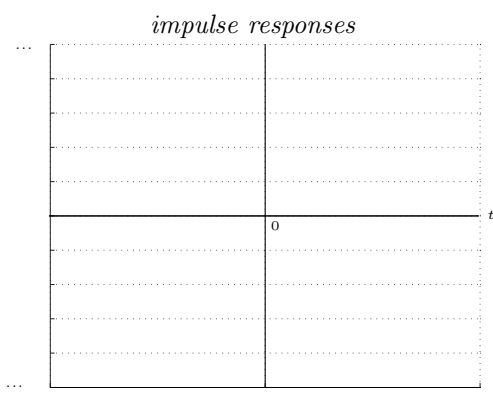
f (kHz)	$v_o$ ( $V_{p-p}$ )	$v_o/v_i$	$20\log(v_o/v_i)$ (dB)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Хүснэгт 2



Зураг 12

- 3.16 Зураг (10)-т үзүүлсэн хэлхээний оролтонд үелсэн гурвалжин хэлбэрийн дохио өгөөд гаралтын дохио тэгш өнцөгт хэлбэртэй болох хүртэл нь давтамжийг өөрчил. Энэ үеийн давтамж, тэгш өнцөгтийн дээд, доод ба дундаж утгуудыг хэмжиж ав.
- 3.17 Мөн гурвалжин дохионы тэгш хэмийг өөрчилж хэмжилтийг давт. Гаралтын дохионд ямар өөрчлөлт гарч байна вэ?
- 3.18 Гурвалжин хэлбэрийн дохио тэгш өнцөгт болох үеийн давтамж, тэгш өнцөгтийн дээд, доод ба дундаж утгуудыг тооцоолох томъёог гарга. Гурвалжин хэлбэрийн дохио яагаад тэгш өнцөгт хэлбэртэй болсныг тайлбарла. Энэ хэлхээ идеал дифференциалчлагчаас ямар ялгаатай вэ?
- 3.19 Аливаа дохионы хувьд RC хэлхээ интегралчлагч буюу дифференциалчлагч болж байгааг хэрхэн тодорхойлох вэ? Өөрөөр хэлбэл тэгш өнцөгт, гурвалжин дохионуудын хувьд бид тэдгээрийн интеграл, дифференциалыг мэдэж байгаа хэдий ч өөр бусад дохионы хувьд RC хэлхээ интегралчлагч буюу дифференциалчлагч болж байхын тулд ямар нөхцөл тавигдах вэ?
- 3.20 Зураг (10)-т үзүүлсэн ШХИ системүүдийн импульсийн ба шилжилтийн тодорхойлогчдыг (*impulse and step responses*) тооцоолж зур.



- 3.21 Зураг (10)-т үзүүлсэн хэлхээгээр нэвтрэхдээ чадал нь хоёр дахин буурсан байх синусоидын давтамж  $B$ -г ол. Үүний тулд давтамжийг аажим өөрчлөн гаралтын дохиог хэмжих замаар  $B$ -г олно.

## 4 Шалгах асуулт

- 4.1 Зураг (9)-т үзүүлсэн хэлхээний хувьд *roll-off*-н хэмжээний /аравт ноогдох dB/ ойролцоо утга нь ямар байх вэ?

- 4.2 Хэрвээ Зураг (9)-н  $C$ -н утга нэмэгдсэн бол энэ нь  $f_{co}$ -н утганд яаж нөлөөлөх вэ?

- 4.3 Хэрвээ Зураг (9)-н  $V_{in}$ -н утга багассан бол энэ нь  $f_{co}$ -н бодит утганд яаж нөлөөлөх вэ?

- 4.4 Зураг (10)-т үзүүлсэн хэлхээний хувьд *roll-off*-н хэмжээний /аравт ноогдох dB/ ойролцоо утга нь ямар байх вэ?

- 4.5 Хэрвээ Зураг (10)-н  $C$ -н утга нэмэгдсэн бол энэ нь  $f_{co}$ -н утганд яаж нөлөөлөх вэ?