

Integrallash sxemalari va ularning vaqt diagrammalari

Integrallash sxemalari – kiruvchi signalni vaqt bo'yicha *integral*ni chiqaruvchi elektron sxemalardir. Boshqacha qilib aytganda, integrator chiqishi kiruvchi signal egasi ostidagi maydonning yig'indisiga teng qiymatga ega bo'ladi. Bunday sxemalar analog signallarni qayta ishlash, filtratsiya, **ramps** va uchburchak to'lqin generatorlari, boshqaruv tizimlari, analog kompyuterlar, A/D o'tkazgichlar kabi ko'plab sohalarda qo'llanadi[1][2]. Masalan, Fiveable tushuntirishicha, integrator sxemalari analitikada kiruvchi signal ostidagi maydonni hisoblaydi va chiqish voltaji kiruvchi signaldan integrallashgan bo'ladi[1]. Operatsion kuchaytirgichli (op-amp) integrator esa kiruvchi signalni vaqt bo'yicha integrallashtirish bilan bog'liq matematik amalni bajaradi; ya'ni uning chiqish kuchlanishi kiruvchi kuchlanishning vaqt bo'yicha integrali miqdoriga proporsional bo'ladi[2][1].

Passiv integrallash sxemalari odatda rezistor-kondensator (RC) tarmoqlari shaklida bo'ladi. Bunday passiv integratorni birinchi darajali **past o'tkazuvchi filtr** deb atash mumkin[3]. Ushbu sxema ketma-ket ulangan R va C elementlaridan iborat bo'lib, chiqish kuchlanishi kondensator bo'ylab olinadi. Past o'tkazuvchi filtr singari, past chastotalarda kondensatorning o'tkazuvchanligi katta bo'lib, chiqish kuchlanishi katta bo'ladi; yuqori chastotalarda esa kondensatorning reaktansi kamayadi va chiqish kuchlanishi kichrayadi[4][3]. Ya'ni, kiruvchi to'lqin chastotasi oshgan sayin C orqali oqim o'tishi osonlashadi, shuning uchun o'rta va yuqori chastotali tarkiblar chiqarilishi kamayadi.

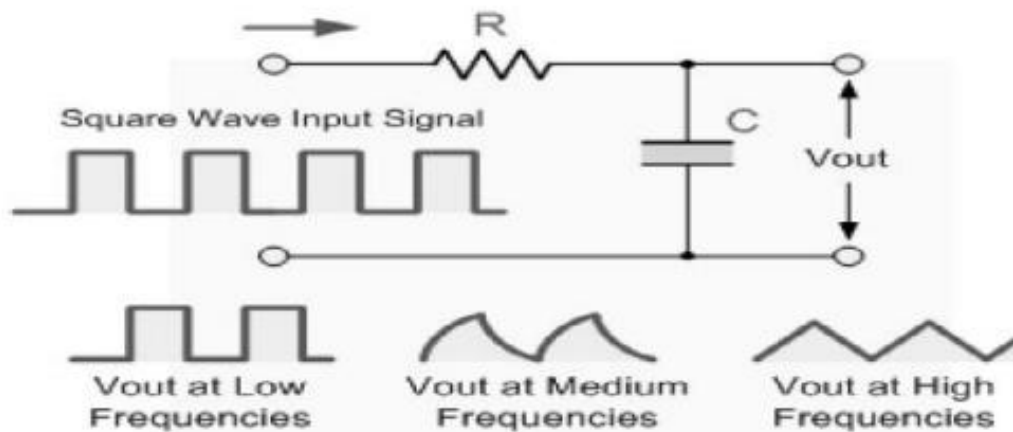
Faol integrator sxemalarida esa operatsion kuchaytirgich qo'llaniladi. Eng oddiy faol integratorida kirish rezistori (R) mos ravishda op-ampning inverting kirishiga ulanadi, chiqish va inverting kirish orasida esa kondensator joylashadi (qanchalik kondensator — o'tkazuvchanlik). Bunday ulanishda op-ampning inverting kiritish qutbi virtual yerdagidek tutib turiladi, ya'ni unga nominal ravishda "0" kuchlanish ta'minlanadi[5][6]. Kirchhoff qonunlariga ko'ra, kiruvchi signal rezistor orqali o'tib kelayotgan kuchlanish oqimi kondensator orqali quvvatlanadi va kondensator zaryadlanadi yoki zaryadi chiqaradi. Integratorning nazariy bog'lanishlaridan chiqadi: $V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt$ (agar op-amp ideal deb olinsa)[7][6]. Bu tenglama shuni anglatadiki, aktif integrator chiqish kuchlanishi kiruvchi kuchlanishning vaqt bo'yicha integrali bilan lineer bog'liq. Matnga ko'ra, kondensator teskari fikslash zaryad oqimini tenglashtirib turadi, shuning uchun chiqish signali kiruvchining to'g'ridan-to'g'ri integrali hosil bo'ladi va uzluksiz fazoviy kechikish bilan ishlaydi[5][6].

Nazariy qism

Passiv integrallash (RC integrator)

Oddiy RC integrator sxemasida rezistor **R** ketma-ket, kondensator **C** esa chiqish uzatmasida joylashadi. Mana shu sxema birinchi tartibli past o'tkazuvchi filtrga to'g'ri keladi[3]. Kiritilgan to'lqin chastotasi nisbatan baland bo'lsa (ya'ni sxemaning **RC vaqt konstantasi katta signallarning davriga nisbatan kichik bo'lsa**), kondensator deyarli qisqa vaqt ichida zaryadlanib, chiqish kuchlanishi chiziqli rampaga o'xshash shaklga yaqinlashadi. Masalan, kvadrat to'lqin kirganda chiqish cho'qqisi to'lqin uzunligi davomida ketma-ket lineer tarzda

zaryadlanib, chegarasida qisman –ishi bilan chiqadi, keyin tiklanadi. Quyidagi rasmda turli chastotalarda RC integratorga kiritilgan kvadrat to‘lqin hamda chiqish signallarining shakli ko‘rsatilgan:



1-rasm. RC integratorga kiritilgan kvadrat to‘lqin va uning chiqish to‘lqinlari (har xil chastotalarda).

Izoh: Past chastotalarda (chapda) har bir kvadrat impuls boshi va oxirida $R \times C$ vaqti bilan o‘tishi past bo‘lgani uchun chiqish to‘lqinida sezilarli ko‘tarilish va pasayish egri chiziqlar bilan yuz beradi. O‘rtacha chastotalarda (o‘rta) chiqish to‘lqini deyarli uchburchak shaklida (ammo tepalari biroz egri) bo‘ladi[8]. Yuqori chastotalarda (o‘ngda) kondensatorning reaktansi yanada kichrayib, chiqish amplitudasi past va to‘lqin ko‘proq dumaloq kurinishga aylanadi[4][8].

Matematik jihatdan, RC integratorga doimiy (step) signal kiritilganda kondensator zaryadlanishi $V_C(t) = V_{in} (1 - e^{-t/(RC)})$, $t \geq 0$, ko‘rinishida ifodalanadi[9]. Bu yerda V_{in} – kiritilayotgan doimiy kuchlanish, RC – sxemaning vaqt konstantasi. Chiqish kondensator voltaji asta-sekin V_{in} ga yaqinlashib boradi. Signal o‘tib ketgach, kondensator esa shu tarzda eksponensial ravishda zaryadini yo‘qotadi: $V_C(t) = V_0 e^{-t/(RC)}$, bu yerda V_0 – dastlabki zaryad kuchlanishi[10]. Shuning uchun to‘g‘ri burchakli impuls kirganda chiqish dastlab ortiqcha kuchlanishga ko‘tarilib, keyin RC vaqt konstantasi bilan cho‘zilgan impuls ravishida kamayadi va oxiri eksponensial pasayadi[9].

Bir so‘z bilan aytganda, passiv RC integrator yuqori chastotali tarkibni kesib tashlab, kiruvchi to‘lqinni filtrlaydi va natijada to‘lqin formasini egri-chiziqli tarzda o‘zgartiradi. Agar RC vaqt konstantasi kiruvchi to‘lqin davriga nisbatan juda katta qilib tanlansa, integratsiya yanada yaxshiroq yaqinlashadi va chiqish to‘lqini ideal uchburchakka yaqinlashadi[4]. Ammo, har doim ham mukammal integrator bo‘la olmaydi: yuqori chastotalar o‘tilsa ham, chiqish chekkalari egri bo‘lib qoladi[8]. Shu bois passiv sxema haqiqiy integrator kabi barcha chastotalarni birdek integrallay olmaydi.

Faol integrallash (op-amp integrator)

Op-amp asosida qurilgan faol integrator ideal holatda kiruvchi signallarni keng chastota diapazonida aniq integrallash imkonini beradi. Bunday sxemaning yaratilishi asosan inverting

kuchaytirgichga o'xshab, ammo fikslash qarshiligini rezistor o'rniga kondensator bilan almashtirish orqali sodir bo'ladi[11]. Natijada sxema inverting kirishga ulanadigan R va fikslash (feedback) zanjirda C bo'lgan sxema hosil bo'ladi. Kuchaytirgichning inverting qutbiga kiruvchi rezistor orqali oqayotgan tok kondensatorga zaryad oqimini beradi, kondensator esa kuchaytirgichning chiqish kuchlanishini o'zgartirib virtual yer shartini saqlaydi[5][6].

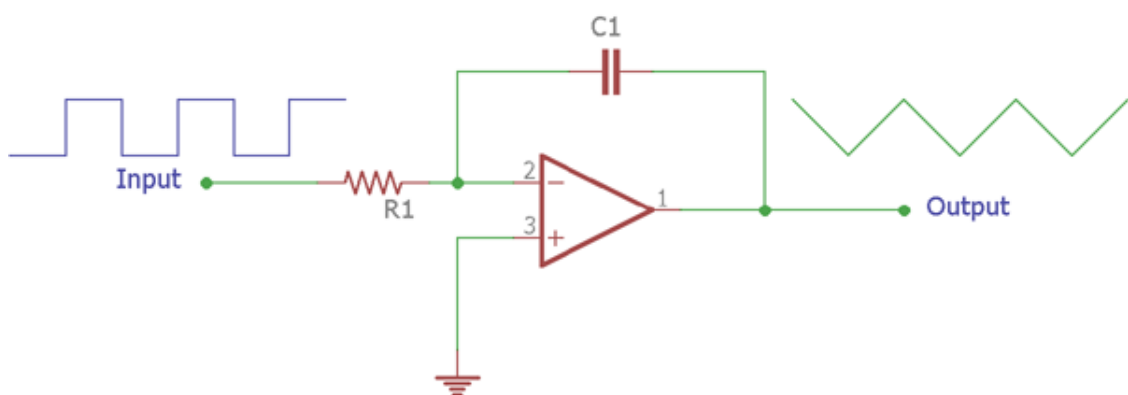
Nazariy jihatdan, ideal op-amp integratorning chiqish kuchlanishi kiruvchi kuchlanishning vaqt bo'yicha integrali bilan bog'liq:

$$V_{\text{out}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{\text{in}}(\tau) d\tau + V_{\text{out}}(0).$$

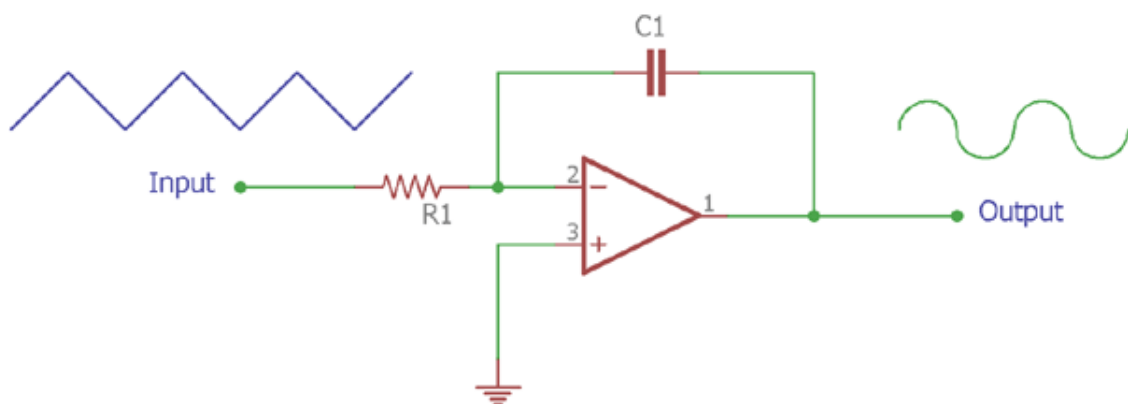
Bu yerda minus belgisi sxema inverting konfiguratsiyadan kelib chiqadi. Yagona R va C elementlari tufayli, ideal op-amp integrator ikki tomonlama funktsiya bajarib, har qanday simmetrik sinusoida kirishi uchun 90° faza surilishini yaratishi mumkin. Masalan, sinusoid kiritilgan taqdirda chiqishda kiruvchi sinx fazasidan qariyb 90° farqlangan kosinus to'qlini hosil bo'ladi[12]. Kvadrat to'qlin kiritilganda esa operatsion kuchaytirgich chiqishida cho'qqi va botkilardan yiroq, **rampa (uchburchak)** to'qlini hosil qiladi – bu sxema aslida ramp generatoriga aylanadi[13]. Quyida faol integratorga sinusoidal, to'qlin-tarbiyali va uchburchak signallar kiritilganda uning chiqish to'qlinlari qanday bo'lishini ko'rsatadigan misol tasvirlangan (ko'k chiziq – kirish, yashil – chiqish):

- Agar op-amp integratoriga **kvadrat to'qlin** bersak, chiqish triugolnik (rampsimon) to'qlin hosil qiladi[13]. Bunda har bir impuls boshida kondensator zaryadlanib, chiqish kuchlanishi qat'iy chiziqli o'sib boradi, impuls oxirida esa qarama-qarshi belgida sohillaydi (1-rasmdagi kvadrat→uchburchak transformatsiyasi).
- Agar **sinusoidal** signal kiritilsa, u holda integrator chiqishi kiruvchi sinusni 90° surib chiqaradi, ya'ni kosinus ko'rinishida chiqadi[12].
- **Uchburchak to'qlin** kirsak, op-amp integratori yuqori chastotali harmonikalarni kesib, chiqishda past chastotali sinus to'qlinini hosil qiladi[14].

Ushbu xatti-harakatlar CircuitDigest sayti izohi bilan quyidagicha bo'ladi: kvadrat to'qlin kirganda hosil bo'ladigan rampaga o'xshash chiqish integrator «ramp generator» sifatida ishlaydi[13]; sinus kirish esa chiqishni 90° kechiktiradi[12]. Shu yo'sinda, faol integrator kiruvchi signaldagi amplitudalarning yig'indisini vaqt bo'ylab joriy inverting terminallar orqali liniy ravishda hisoblab boradi, ya'ni haqiqiy integralsimon xulq-atvorni ta'minlaydi.



2-rasm. Operatsion kuchaytirgichli integratorga kiritilgan kvadrat to‘lqin (ko‘k) va uning chiqishi – uchburchak to‘lqin (yashil)[13].



3-rasm. Op-amp integratorga kiritilgan uchburchak to‘lqin (ko‘k) va uning chiqishi – yaqin sinusoid to‘lqini (yashil)[14].

Yuqoridagi rasmlardan ko‘rinib turibdiki, faol integrator turli to‘lqin turlarini o‘zgartirishda foydali (to‘lqin shakllarini yasash) vosita hisoblanadi. Biroq ideal integrator qurilishi davomida ayrim muammolar paydo bo‘ladi: masalan, doimiy komponentni (DC) integrallash cheksiz rampaga olib boradi va amalda op-amp chiqishi to‘yingan (saturatsiya) bo‘lib qolishi mumkin. Shu sababli haqiqiy faol integratorlarga **kondensatorga parallel rezistor** qo‘shiladi, bu past chastotalar uchun teskari aloqa kanalini ta‘minlab chiqishning barqarorligini kafolatlaydi[15]. Aks holda, integrator shu doimiy xato kuchlanish tufayli chiqqichiga yetarli kuchlanish to‘planib ketishi mumkin.

Integrallash sxemalarining amaliy qo‘llanilishi

Integrallash sxemalari elektronika va boshqaruv sohalarida keng qo‘llaniladi. Ular signallarni *past chastotali tarkibga* o‘tkazuvchi filtr sifatida xizmat qiladi, shuningdek sinxron shaklni o‘zgartiruvchi qurilmalar bo‘lib, rampalar va uchburchak to‘lqinli generatorlarni yasashga xizmat qiladi[16][17]. Masalan, CircuitDigest ta’kidlashicha, integratorlarni asosan instrumentatsiya (uskunalarni tekshirish) va ramp generatorlarda qo‘llashadi; funktsiya generatorlarida kvadrat to‘lqinni uchburchak to‘lqinga aylantirish uchun; to‘lqin shakllantirishlarda turli xil zaryad amplifikatorlari sifatida; analog kompyuterlarda integratsiya vazifalarini bajarish uchun; ADU (analog-raqam konverterlarida) va turli sensorlardan foydali signallar olishda[16]. Fiveable ma’lumotlari ham integratorlardan analog filtrlar, to‘lqin

generatorlari va nazorat boshqaruv tizimlarida (feedback-control) foydalanilishini qayd etadi[17].

Umuman olganda, integrallash sxemalari avtomatik boshqaruv, signal qayta ishlash (masalan, past chastota filtrlash) va elektron test asboblari muhim o'rin tutadi. Misol uchun, boshqaruv tizimlarida PID-regulyator ichidagi integratsiya elementlari tizimda xatoni yig'ib borib qayta tuzatishga xizmat qiladi. Shuningdek, audio texnikada signalni yumshatish, masalan, «reconstruction filter» sifatida oddiy RC integratorlar ishlatiladi[18][16].

Misollar va hisob-kitoblar

Quyida turli tipdagi kirish signallariga nisbatan integratorlar qanday chiqish berishini misollar orqali ko'rib chiqamiz.

- **To'g'ri burchakli impuls (kvadrat impuls):** Passiv RC integratorga kichik (tor) impuls kiritilganda kondensator darhol iste'mol qilingan to'liq davomida zaryadlanadi. Masalan, $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$, $V_{\text{in}} = 5 \text{ V}$ bo'lsa, integratorning vaqt konstantasi $RC = 0.1 \text{ s}$ bo'ladi. Agar impuls davomiyligi $T = 2 \text{ ms}$ bo'lsa, kondensatorning chiqish kuchlanishi formulasi $V_C = 5(1 - e^{-t/0.1})$ dan taxminan impuls oxiriga yetganda $V_C \approx 5(1 - e^{-0.002/0.1}) \approx 0.10 \text{ V}$ atrofida bo'ladi[9]. Chiqish to'liqni impuls tugagach asta-sekin pasayadi (ekvivalent $V_0 e^{-t/RC}$ formulasi bilan)[10]. Faol (op-amp) integrator esa bunday impuls chiqishda doimiy ravishda chiziqli sur'at bilan o'sadi: $V_{\text{out}} = -\frac{1}{RC} V_{\text{in}} t$. Yuqoridagi raqamlar bilan, $RC = 0.1$ da $V_{\text{out}}(T) = -\frac{5}{0.1} \cdot 0.002 = -0.10 \text{ V}$ ga teng bo'ladi. (Bu ham taxminan 0.1 V chiqish beradi.) Keyingi daqiqa va undan so'ng integratorning chiqishi saqlanib qoladi (ya'ni doimiy kiritish bo'lsa saturatsiya sodir bo'ladi).
- **Sinusoidal signal:** Agar $V_{\text{in}} = V_0 \sin(\omega t)$ va operativ integrator ideal deb olinadigan bo'lsa, chiqish $V_{\text{out}} = -\frac{V_0}{\omega RC} \cos(\omega t)$ ga o'xshash bo'ladi, ya'ni sinusoidning fazasi 90° ga suriladi va amplituda ωRC ga bog'liq bo'ladi. Misol uchun, $R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ qiymatda $\omega = 1000 \cdot 2\pi \text{ rad/s}$ ($f = 1 \text{ kHz}$) bo'lsa, $\omega RC = 2\pi \cdot 1000 \cdot 0.1 \approx 628$. Shunda chiqish amplitudasi kirishnikiga nisbatan taxminan $\frac{1}{628}$ qism bo'lib kichrayadi (ya'ni juda kichik chiqadi). Shuningdek, chiqish 90° surilgan holda paydo bo'ladi[12]. Passiv RC sxemasida ham sinus chiqarish chiziqli bo'lib, lekin u ideal integratordek 90° emas, balki chastotaga mos ravishda kamroq kechikish beradi va amplitudasi $\frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}$ munosabatda kichrayadi.
- **Doimiy kuchlanish (step-input):** Doimiy joriy V_{in} kiritilganda passiv RC sxema yuqorida aytilganidek eksponensial zaryadlanadi [9] va oxir-oqibat $V_{\text{out}} = V_{\text{in}}$ da to'yinadi. Faol integrator esa ideal holda $V_{\text{out}}(t) = -\frac{V_{\text{in}}}{RC} t$ chiziqli rampa bo'yicha o'sadi. Masalan, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ va $V_{\text{in}} = 1 \text{ V}$ bo'lsa,

$$V_{\text{out}}(t) = -\frac{1}{10^{-3}} t = -1000 t \quad (\text{V/s}).$$

Demak, bir soniyada chiqish –1000 V ga cho‘zilib ketadi (amaliyada bu saturatsiyani bildiradi). Shuning uchun haqiqiy sxemalarda quvvatlaydigan DC yo‘nalishida muntazam rezistor qo‘shilib, bu cheklov bartaraf etiladi[15].

Yuqoridagi misollar yordamida ko‘rish mumkinki, **passiv RC integratorlar** oddiy va ishonchli bo‘ladi, ammo faqat chegara holatlarida haqiqiy integratsiya vazifasini ta‘minlaydi; doimiy kirishni aniq integrallamaydi va chiqish to‘lqini egri chiziqli bo‘ladi[19]. **Faol integratorlar** esa aniqroq matematik integratsiya qiladi, lekin real amaliy cheklovlarga egadir: op-amp nol-ofsetlari va quvvati cheklovlari tufayli chiqish o‘zgarishlarida tez saturatsiyalanish yoki drift paydo bo‘lishi mumkin[15][20].

Xulosa

Mazkur ishda passiv (RC) va faol (op-amp asosidagi) integrator sxemalarining nazariy asoslari, ularning kiruvchi va chiqish signallari uchun vaqt bo‘yicha xulq-atvori hamda amaliy qo‘llanilish sohalari ko‘rib chiqildi. Passiv RC integratorlar birinchi tartibli past o‘tkazuvchi filtr bo‘lib, yuqori chastotali tarkibni yutish orqali kiruvchi signalni **taxminiy integrallashtiradi**[4][19]. Biroq ular haqiqiy integrallash vazifasini faqat chegaralangan sharoitlarda bajaradi: vaqt konstantasi kichik bo‘lgan kiruvchi impulslarda chiqish to‘lqini biroz dumaloq chiqadi, doimiy kirishga esa eksponensial javob beradi[8][9]. Faol integratorlar esa ideal sharoitda keng chastota oralig‘ida chiziqli integrallashtirishni ta‘minlaydi[7][6]. Shu bilan birga, ularni amaliyada ishlatish uchun kondensatorga parallel rezistor qo‘shish kabi choralar ko‘riladi, chunki DC komponenta ularning chiqishini to‘yinganlikka olib kelishi mumkin[15].

Umuman olganda, integrator sxemalarining afzalligi ulkan: ular analog signallarni qayta ishlash va boshqaruv tizimlarida zarur matematik operatsiyalarni oddiy sxemalar yordamida bajarishga imkon beradi. Kamchiligi – passiv shaklda ular faqat noideal birinchi tartibli yagona davriysiz sxema bo‘lib, operatsion sxemaga qaraganda kamroq aniq integrallashtiradi; faol shaklda esa chirigan kuchaytirgichlar tufayli DC drifti va dinamik diapazon cheklovlari mavjud. Shu bilan birga, amaliy chora-tadbirlar yordamida (masalan, rezistorlar yordamida DC yo‘nalishni nazorat qilish) integratorlarning samaradorligini oshirish mumkin[15][20].

Adabiyotlar ro'yxati

- Fiveable. *Key Terms: Integrator*. (Elektronika tizimlari, AP kurs materiallari)[1][7].
 - Wikipedia. “*Op amp integrator*” maqolasi[2].
 - Brainkart.com. “*The RC Integrator*” (elektronika darsligi)[21][4].
 - HandWiki. “*Engineering: Passive integrator circuit*” (elektronika ensiklopediyasi)[3].
 - Kuphaldt, T. R. “*Passive integrator and differentiator circuits*” (Lessons In Electric Circuits, Socratic)[8][19].
 - National Instruments (NI). “*Transient Response of RC Circuit*” (o‘quv qo‘llanma)[9][10].
 - CircuitDigest. Sourav Gupta, “*Op Amp Integrator Circuit: Working & Applications*”[6][13].
-

[1] [7] [17] [20] Integrator - (Electrical Circuits and Systems I) - Vocab, Definition, Explanations | Fiveable

<https://fiveable.me/key-terms/electrical-circuits-systems-i/integrator>

[2] [5] Op amp integrator - Wikipedia

https://en.wikipedia.org/wiki/Op_amp_integrator

[3] [18] Engineering:Passive integrator circuit - HandWiki

https://handwiki.org/wiki/Engineering:Passive_integrator_circuit

[4] [21] The RC Integrator

https://www.brainkart.com/article/The-RC-Integrator_13326/

[6] [11] [12] [13] [14] [15] [16] Op Amp Integrator Circuit: Construction, Working and Applications

<https://circuitdigest.com/tutorial/op-amp-integrator-circuit-working-construction-applications>

[8] [19] int_diff.dvi

https://www.ibiblio.org/kuphaldt/socratic/output/int_diff.pdf

[9] [10] Microsoft Word - LAB5new.doc

<https://download.ni.com/pub/gdc/tut/lab5.pdf>