ՄԻԿՐՈԷԼԵԿՏՐԱՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐ ԵՎ ՏՎԻՉՆԵՐ

MEMS, տվիչներ և չափման համակարգի կառուցվածքը

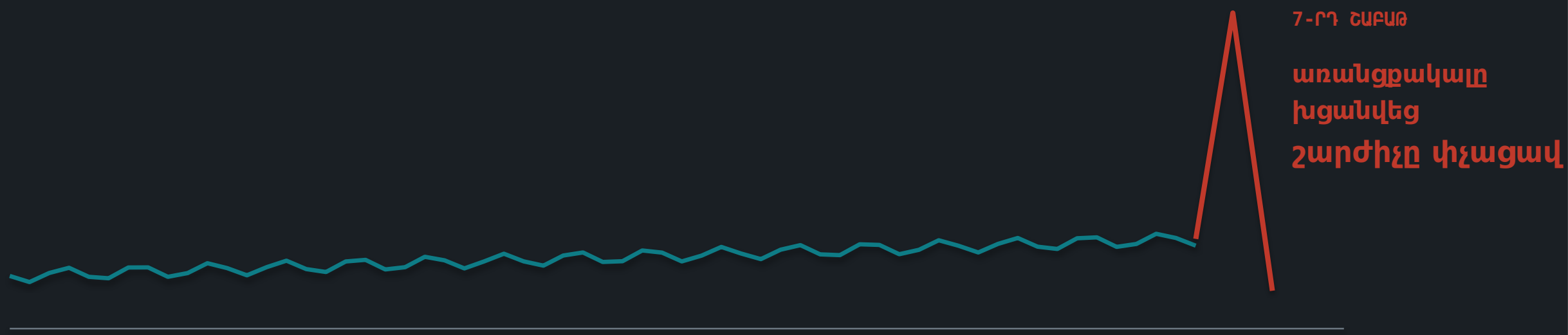
Դասախոսություն 1 / 16 · 80 րոպե · Բաժին Ա. Հիմունքներ

Բակալավրիատ · Էլեկտրատեխնիկա · 7-րդ կիսամյակ
Էներգետիկայի և էլեկտրատեխնիկայի ինստիտուտ

Շարժիչը, որը փչացավ հսկողության ներքո

1500 պտ/րոպե ասինխրոն շարժիչ։ Թրթռման հսկիչ։ Վեց շաբաթվա տվյալներ։

Վեց շաբաթ՝ հանգիստ



1-ին շաբաթ

20 Hz · ամպլիտուդը դանդաղ աճում է · ընկալվել է որպես բնականոն բեռ

Ոչինչ չի խափանվել

Հետագա քննությունը ստուգել է բոլոր բաղադրիչները

Աքսելերոմետրը	✓	համապատասխանում էր datasheet-ի բոլոր թվերին
Տպատախտակը	✓	անսարքություն չհայտնաբերվեց
Ծրագրային ապահովումը	✓	սխալ չհայտնաբերվեց
Տվյալների գրանցիչը	✓	գրանցել է ամեն մի նմուշ
Ինժեները	✓	ամեն շաբաթ նայել է էկրանին

Որտե՞ղ էր սխալը

A Աքսելերոմետրը չափազանց էժան էր արդյունաբերական կիրառության համար

B Ծրագրում սխալ կար, որը ոչ ոք չգտավ

C Ոչ ոք չսահմանեց նմուշառման հաճախությունը՝ ելնելով վնասվածքի հաճախությունից

D Առանցքակալի մաշվածությունը հնարավոր չէ հայտնաբերել թրթռման միջոցով

E Սպասարկող խումբը անտեսեց աճող միտումը

Որոշե՛ք հիմա, առանց քննարկման։ Պատասխանը ցույց կտամ վերջին տասը րոպեին — և կտեսնեմ՝ կփոխե՞ք կարծիքը։

Ինչ է այս դասընթացը

և, նույնքան կարևոր՝ ինչ չէ

ԱՅՍ ԴԱՍԸՆԹԱՑՆ Է

Իրական տվիչների ընտրություն, միացում, ստուգաչափում, վալիդացում իրական համակարգերում։

ԱՅՆ ՉԷ

Մաքուր սենյակի արտադրության դասընթաց։

Արտադրությանն անդրադառնում ենք մեկ անգամ՝ 4-րդ դասախոսությունում, միայն

Դասընթացի սկզբունքը՝ չափվող մեծությունը → տվիչի ընտրություն → միացում → վերամշակելի տվյալներ → ստուգաչափում → մշակում կամ միավորում → վալիդացում։

Այսօրվա վերջում դուք կկարողանաք…

01 **ԳԾԵԼ** ուղին ֆիզիկական մեծությունից մինչև գրանցված թիվ, և ասել՝ որտեղ է կորչում տեղեկույթը

02 **ԴԱՍԵԼ** անծանոթ սարքը՝ տվիչ, փոխակերպիչ թե ակտուատոր — և անվանել չափվող մեծությունը

03 **ԳՈՒՇԱԿԵԼ** մասշտաբման օրենքներից՝ ինչու են MEMS սարքերն արագ — և ինչը վատանում է փոքրացման դեպքում

04 **ՎԵՐԱԾԵԼ** անորոշ պահանջը չափման բնութագրի, ըստ որի կարելի է պատվեր տալ

Ուշադրություն. չորսն էլ բայեր են։ Ոչ մեկը «իմանալ մասին» չէ։

Ճղթան

Չափումը բաղադրիչ չէ։ Այն ուղի է — իսկ ուղին ճշմարիտ է այնքան, որքան իր ամենաթույլ օղակը։ Այս ուղին կկառուցենք քայլ առ քայլ։

Երեք բառ, որ կօգտագործենք ճշգրիտ

որովհետև այսուհետ տարբերությունը կարևոր է

ՏՎԻՉ

Ֆիզիկական մեծությունը վերածում է ազդանշանի, որը կարող եք կարդալ։

MEMS խոսափող
ձայնային ճնշում → լարում

ՓՈԽԱԿԵՐՊԻՉ

Էներգիան վերածում է մի տեսակից մյուսի։ Տվիչը դրա տեսակներից է։

բարձրախոս, դեֆորմացիայի տվիչ,
պիեզո սկավառակ — երկու ուղղությամբ

ԱԿՏՈՒԱՏՈՐ

Ազդանշանը վերածում է ֆիզիկական ազդեցության աշխարհի վրա։

MEMS հայելի
լարում → ճառագայթի շեղում

Այս դասընթացում ամեն ակտուատոր նաև չափման խնդիր է. դուք գիտեք, որ այն գործել է, միայն եթե զգում եք արդյունքը։

Երեսուն վայրկյան

Տվիչ, փոխակերպիչ թե ակտուատոր: Իսկ ո՞րն է չափվող մեծությունը

MEMS խոսափող	Պիեզո ազդանշանիչ	Դեֆորմացիայի տվիչ	MEMS հայելի
?	?	?	?

Դարձե՛ք հարևանին: Չորս սարք, երեսուն վայրկյան: Չափվող մեծությունը բարձրաձայն ասե՛ք:

Այս չորսից մեկը պասիվ է — փոխում է դիմադրությունը և կարիք ունի սնման հոսանքի, որպեսզի ընդհանրապես ինչ-որ բան «ասի»: Ո՞րը, և ինչու՞ է դա կարևոր

Չափվող մեծությունը

1

ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄԵԾՈՒԹՅՈՒՆ

ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԿԱՊԱԿՑՈՒՄ

ՓՈԽԱԿԵՐՊՈՒՄ

ԱՆԱԼՈԳԱՅԻՆ ՄՇԱԿՈՒՄ

ԺԱՄԱՆԱԿԱՆԻՇ, ԳՐԱՆՑՈՒՄ, ՈՐՈՇՈՒՄ

ԿՈԴԵՐ → ՄՀ ՄԻԱՎՈՐՆԵՐ

ՆՄՈՒՇԱՌՈՒՄ ԵՎ ՔՎԱՆՏԱՑՈՒՄ

Այն չի սկսվում տվիչից

Չափման շղթան

1 **ՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՄԵԾՈՒԹՅՈՒՆ** → 2 **ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԿԱՊԱԿՑՈՒՄ** → 3 **ՓՈԽԱԿԵՐՊՈՒՄ**

ԱՆԱԼՈԳԱՅԻՆ ՄՇԱԿՈՒՄ

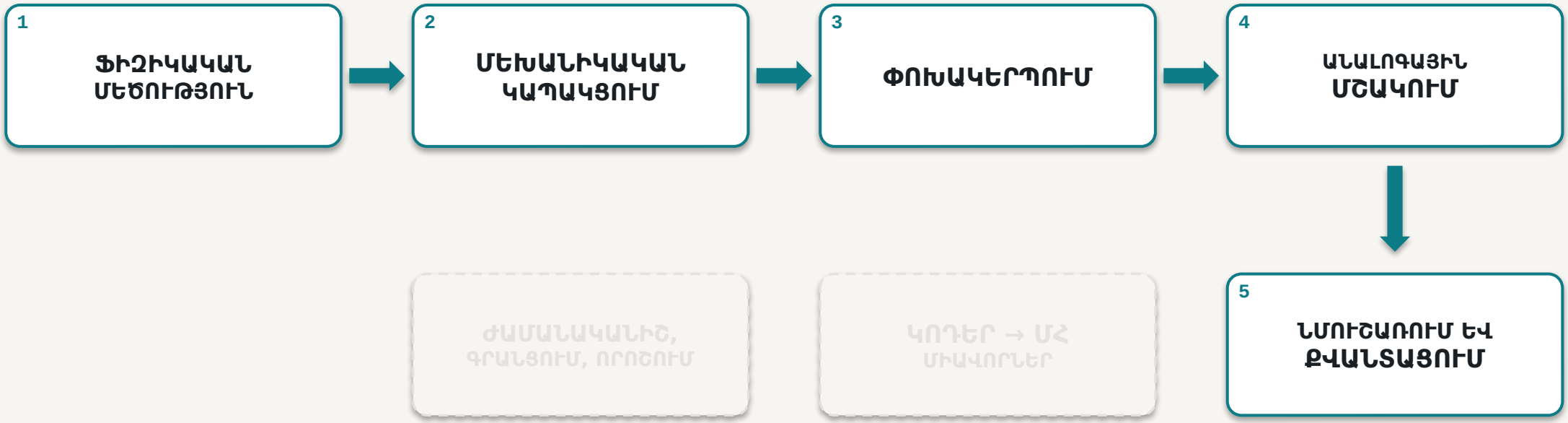
ԺԱՄԱՆԱԿԱՆԻՇ, ԳՐԱՆՑՈՒՄ, ՈՐՈՇՈՒՄ

ԿՈԴԵՐ → ՄՀ ՄԻԱՎՈՐՆԵՐ

ՆՄՈՒՇԱՌՈՒՄ ԵՎ ՔՎԱՆՏԱՑՈՒՄ

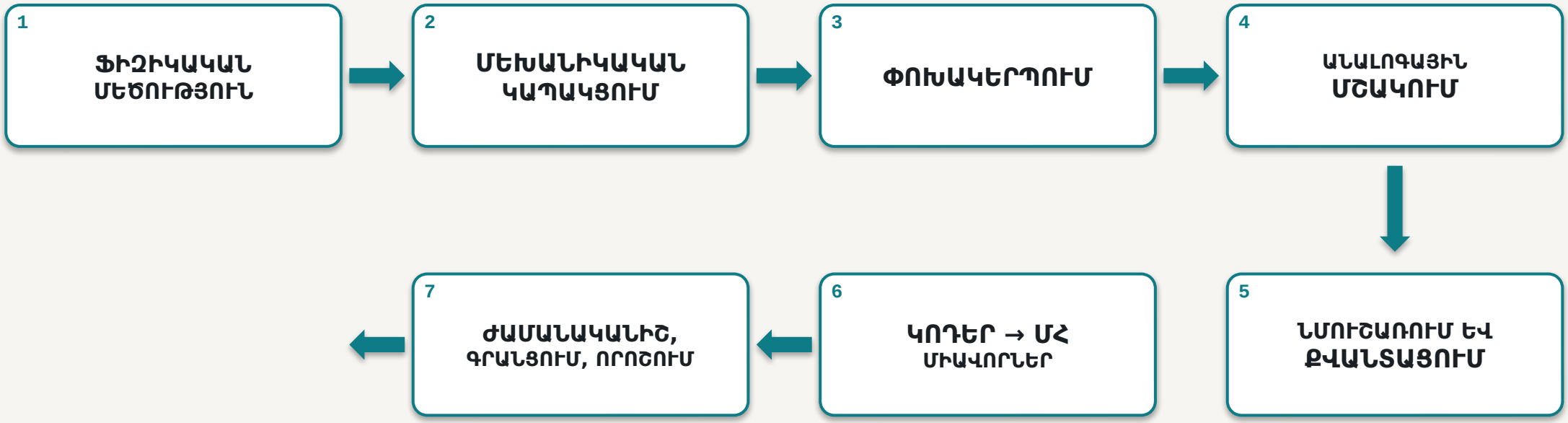
Էլեկտրոնիկայի միջով

Չափման շղթան



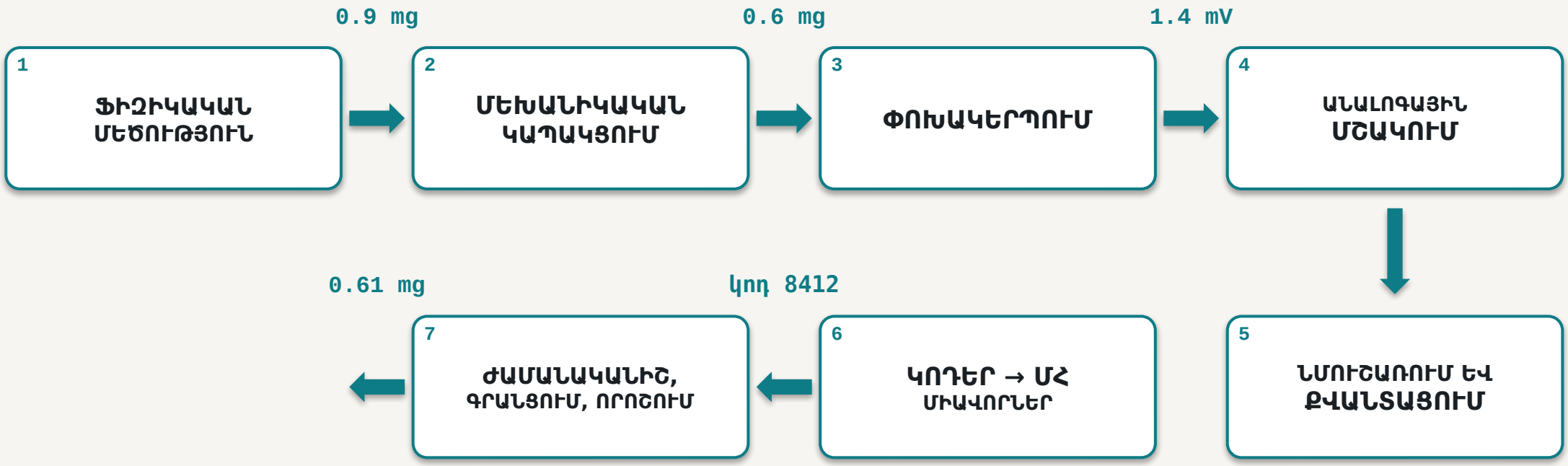
Ամբողջական շղթան

Չափման շղթան



Նույն շղթան՝ իրական թվերով

Մեկ 0.9 mg թրթռում՝ ամբողջ ճանապարհը մինչև որոշում



Ուշադրություն 2-րդ փուլին. մեխանիկական ուղին արդեն կորցրել է ազդանշանի մեկ երրորդը — դեռ ոչ մի էլեկտրոն չի շարժվել:

Որտեղ է կորչում ճշմարտությունը

և արդյոք երբևէ կարող եք վերականգնել այն

Փուլ	Ինչ է կորչում	Վերականգնելի՞ է հետո
2 Մեխանիկական կապակցում	ամպլիտուդ և փուլ, հաճախությունից կախված	Ոչ — չափե՛ք ինքներդ
3 Փոխակերպում	առանցքային խաչաձև ազդեցություն, ոչ գծայնություն, ջերմային շեղում	Մասամբ — ստուգաչափմամբ
4 Մշակում	հագեցումը կտրում է գագաթները. սխալ ֆիլտրը սպանում է ազդանշանը	Ոչ
5 Նմուշառում	ամեն ինչ նմուշառման հաճախության կիսից վեր՝ ալիասինգով ներս է ընկնում	Երբեք
5 Քվանտացում	մանրամասնություն մեկ LSB-ից ցածր	Մասամբ — միջինացմամբ
6 Միավորների բերում	ճշտություն, եթե զգայունության հաստատունը սխալ է	Այո — վերահաշվե՛ք
7 Ժամանականիշ	ժամանակի առանցքը, հետևաբար՝ ամբողջ հաճախային պարունակությունը	Ոչ

Սրանցից երեքը անվերադարձ են: Նախագծման որոշումներ են, ոչ ստուգաչափման խնդիրներ:

0.061 mg լուծունակությամբ աքսելերոմետրը ամրացված է շարժիչի իրանին 5 մմ ռետինե միջադիրի միջոցով: Ո՞ր փուլն է արդեն ոչնչացրել հաղորդված թվի ճշտությունը

A Թվայնացումը — 16 բիթը չի կարող ապահովել երեք տասնորդական նշան

B Միավորների ձևափոխումը — mg-ը երբեք չի վերածվել m/s^2-ի

C Մեխանիկական կապակցումը — ռետինե միջադիրը ֆիլտրում է թրթռումը, մինչ էլեկտրոնիկան տեսնի այն

D Ոչ մի փուլ — 0.061 mg լուծունակությունը երաշխավորում է, որ նշանները իմաստալից են

Նախ քվեարկե՛ք ինքնուրույն: Ապա գտե՛ք մեկին, ով համաձայն չէ ձեզ հետ:

0.061 mg լուծունակությամբ աքսելերոմետրը ամրացված է շարժիչի իրանին 5 մմ ռետինե միջադիրի միջոցով: Ո՞ր փուլն է արդեն ոչնչացրել հաղորդված թվի ճշտությունը

A Թվայնացումը — 16 բիթը չի կարող ապահովել երեք տասնորդական նշան

B Միավորների ձևափոխումը — mg-ը երբեք չի վերածվել m/s^2-ի

C **Մեխանիկական կապակցումը — ռետինե միջադիրը ֆիլտրում է թրթռումը, մինչ էլեկտրոնիկան տեսնի այն**

D Ոչ մի փուլ — 0.061 mg լուծունակությունը երաշխավորում է, որ նշանները իմաստալից են

Չափման շղթան սկսվում է տվիչից առաջ: Եթե մեխանիկական ուղին «ստում է» իներցիոն զանգվածին, հետագա ոչ մի ճշգրտություն ճշմարտությունը չի վերականգնի:

Շղթան սկսվում է տվիչից առաջ։

Ձեր չափիչ սարքը ներառում է պտուտակը, ամրակն ու իրանը։ Դրանցից ոչ մեկը datasheet-ում չկա, և բոլորն էլ ձե՛րն են։

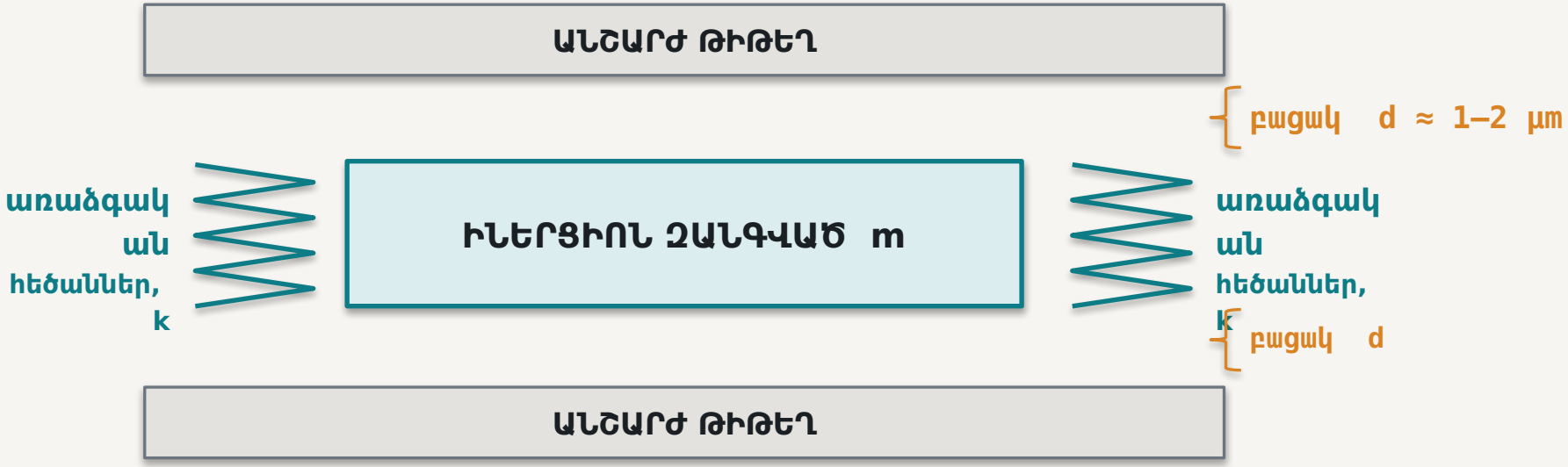
Ինչու է միկրոաշխարհը այլ

Երեք տարի ձեռք եք բերել ինտուիցիա մեքենաների վրա, որ կարող եք ձեռքում պահել։

Միկրոմետրային մասշտաբում այդ ինտուիցիայի կեսը շրջվում է։ Ահա՛ թե որ կեսը։

Ինչ կա իրականում ներսում

Ունակային MEMS աքսելերոմետր՝ լայնական կտրվածքով



Արագացումը շարժում է զանգվածը: Շարժումը փոխում է երկու բացակները — մեկը մեծանում է, մյուսը՝ փոքրանում — և դիֆերենցիալ ունակությունը C = εA/d հանդիսանում է ազդանշանը:

Ահա՛ ամբողջ սարքը — datasheet-ի ամեն ինչ m, k և d-ի հետևանք է:

Փոքրացրե՛ք բոլոր չափերը նույն գործակցով

Իզոտրոպ մասշտաբում. երկարություն, լայնություն, հաստություն — բոլորը s գործակցով

$$m \propto L^3$$

զանգվածը մասշտաբվում է ծավալի հետ

$$k \propto L^1$$

հեծանի կոշտություն $k = E \cdot w \cdot t^3 / 4L^3$

Նրանք միասին չեն մասշտաբվում։ Այս մեկ փաստն է ամբողջ դասախոսությունը։

Տեղադրե՛ք w, t և L-ը նույն s գործակցով $k = E \cdot w \cdot t^3/4L^3$ բանաձևում և կստանաք $s \cdot s^3/s^3 = s$։ Կոշտությունը նվազում է գծայնորեն։ Զանգվածը՝ խորանարդորեն։

Ուստի ռեզոնանսային հաճախությունը աճում է

$$f_0 = (1/2\pi) \cdot \sqrt{(k/m)} \propto \sqrt{(L^1 / L^3)} = \sqrt{(L^{-2})} = 1 / L$$

Փոքրացրե՛ք սարքը 10 անգամ → ռեզոնանսային հաճախությունը աճում է 10 անգամ

Սարք	Բնորոշ չափ	Ռեզոնանս
Կամրջի թռիչք	100 m	≈ 0.2 Hz
Կարգաբերիչ պատառաքաղ	10 cm	≈ 440 Hz
MEMS աքսելերոմետր	300 μm	≈ 5 kHz
MEMS գիրոսկոպի շարժիչ	100 μm	≈ 20 kHz
MEMS ՌՀ ռեզոնատոր	10 μm	≈ 100 MHz+

Ահա թե ինչու MEMS-ը կարող է չափել արագ երևույթներ։

Տվիչը չի կարող հավաստի հաղորդել իր սեփական ռեզոնանսին մոտ ազդանշանները — ուստի բարձր f_0-ն է, որ ապահովում է թողունակությունը։

MEMS աքսելերոմետրի ներցիոն զանգվածը և առաձգական հեծանները փոքրացվել են 10 անգամ: Ո՞ր պնդումը ճիշտ է

A Ռեզոնանսային հաճախությունը աճում է ×10, և ջերմամեխանիկական աղմուկը վատանում է

B Ռեզոնանսային հաճախությունը նվազում է ×10, և աղմուկը լավանում է, քանի որ սարքը փոքր է

C Ռեզոնանսային հաճախությունը չի փոխվում — զանգվածն ու կոշտությունը փոքրանում են, ուստի հարաբերությունը հաստատուն է

D Ռեզոնանսային հաճախությունը աճում է ×10, և աղմուկը լավանում է, քանի որ քիչ նյութ է թրթռում

Դասախոսության ամենադժվար հարցը: Օգտագործե՛ք գրատախտակի երկու ցուցիչները, ոչ թե ձեր ինտուիցիան:

MEMS աքսելերոմետրի իներցիոն զանգվածը և առաձգական հեծանները փոքրացվել են 10 անգամ: Ո՞ր պնդումը ճիշտ է

A **Ռեզոնանսային հաճախությունը աճում է ×10, և ջերմամեխանիկական աղմուկը վատանում է**

B Ռեզոնանսային հաճախությունը նվազում է ×10, և աղմուկը լավանում է, քանի որ սարքը փոքր է

C Ռեզոնանսային հաճախությունը չի փոխվում — զանգվածն ու կոշտությունը փոքրանում են, ուստի հարաբերությունը հաստատուն է

D Ռեզոնանսային հաճախությունը աճում է ×10, և աղմուկը լավանում է, քանի որ քիչ նյութ է թրթռում

Ջերմամեխանիկական աղմուկը ∝ √(4kBT·ω₀ / mQ) — աճում է, երբ իներցիոն զանգվածը նվազում է: Դուք ձեռք եք բերում թողունակություն և վճարում աղմուկի հատակով:

Փոքրը միանշանակ ավելի լավը չէ

Սարքի փոքրացման ազնիվ հաշվեկազմը

ԼԱՎԱՆՈՒՄ Է

- Թողունակություն — $f_0 \propto 1/L$
- Արձագանքում և ջերմային կայունացում
- Հզորություն մեկ սարքի հաշվով
- Արժեք մեկ սարքի հաշվով, մեծ ծավալում
- Խմբաքանակ՝ հազարներ մեկ թիթեղից

ՎԱՏԱՆՈՒՄ Է

- Աղմուկի հատակ $\propto 1/\sqrt{m}$
- Կպչողություն — մակերևույթն է գերիշխում
- Զգայունություն փաթեթի լարվածությանը
- Ջերմային շեղում և զրոյի կայունություն
- Աղտոտում. փոշին ճակատագրական է

Մակերես / ծավալ ∝ 1 / L — փոքր մասշտաբում աշխարհին ամբողջովին մակերես է:

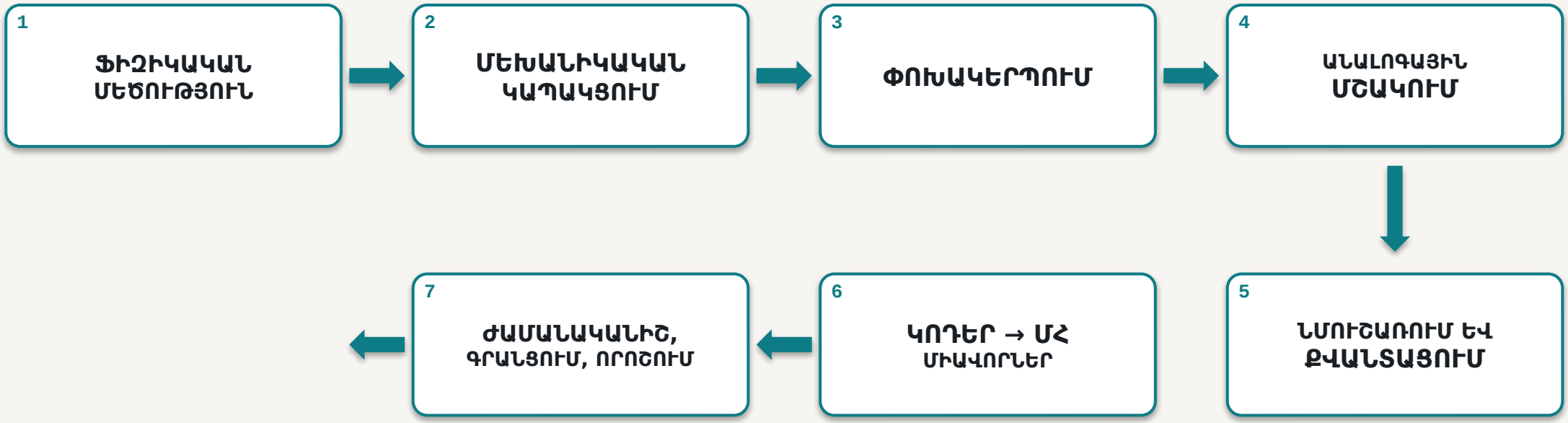
Սլայդներն անջատած։ Թուղթը դուրս։

1. Ոտքի՛ ելեք։ Իսկապես ոտքի։
2. Զույգերով, մեկ թերթ. վերագծե՛ք չափման շղթան հիշողությամբ։ Ամեն վանդակ, ամեն սլաք։ 90 վայրկյան։
3. X նշե՛ք ամեն վանդակի վրա, որտեղ շարժիչի թիվը կարող էր փչանալ։

Պահե՛ք այս թերթը։ Կօգտագործեք լաբորատորիայում 2-րդ շաբաթում։

Ստուգե՛ք ձեր թերթը

Ուղղե՛ք այլ գույնով — չվերագրեք



Երկու վանդակ ամենից շատ մոռացվում է՝ մեխանիկական կապակցումը և ժամանականիշը։
Երկուսն էլ datasheet-ում անտեսանելի են։ Երկուսն էլ ձե՛ռն են։

Ցանկությունից՝ տեխնիկական բնութագիր

Ոչ ոք ձեզ երբեք տեխնիկական բնութագիր չի տա։ Ձեզ կտան մի նախադասություն՝ հաջորդ սլայդի նման, և վերջում կսպասեն չափիչ սարք։

«Ուղղակի ասե՛ք՝ արդյոք շարժիչը չափազանց թրթռում է»։

Ահա՛ իրական պահանջի տեսքը։ Այն չի պարունակում ո՛չ մեծություն, ո՛չ տիրույթ, ո՛չ թողունակություն, ո՛չ ճշտություն, ո՛չ միջավայր։ Սա դեռ ինժեներական խնդիր չէ։

Յոթ հարց՝ ցանկությունից դեպի բնութագիր

ՄԵԾՈՒԹՅՈՒՆ	Ո՞ր ֆիզիկական մեծությունը, ո՞ր միավորներով
ՏԻՐՈՒՅԹ	Նվազագույն և առավելագույն արժեքը, որ պետք է հաղորդվի
ԼՈՒԾՈՒՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆ	Նվազագույն փոփոխությունը, որ պետք է տարբերակելի լինի
ՃՇՏՈՒԹՅՈՒՆ	Որքա՞ն կարող է սխալ լինել ցուցմունքը — և ո՞ր ջերմաստիճաններում
ԹՈՂՈՒՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆ	Որքա՞ն արագ է փոփոխվում։ Ո՞րն է կարևոր առավելագույն հաճախությունը
ՄԻՋԱՎԱՅՐ	Ջերմաստիճան, խոնավություն, թրթռում, խանգարումներ, սնում, հզորություն
ԵԼՔ	Ո՞վ, ի՞նչ ձևով, ի՞նչ հաճախությամբ, ի՞նչ ժամանականիշով

Այս յոթից մեկը սպանեց շարժիչը։ Դուք արդեն գիտեք՝ որը։

Նույն պահանջը՝ բնութագրված

Այժմ սա մի բան է, ըստ որի կարելի է պատվիրել

	Բնութագիր	Որտեղից է եկել թիվը
Մեծություն	իրանի արագացում, m/s² RMS	առանցքակալը ճառագայթում է հենց թրթռում
Տիրույթ	±16 g	հարվածային անցողիկ պրոցեսներ, ոչ կայուն թրթռում
Լուծունակություն	≤ 5 mg	ամենավաղ հայտնաբերելի վնասվածքը ≈ 30 mg
Ճշտություն	±5 % ցուցմունքից, 0–70 °C	միտումի հայտնաբերում, ոչ բացարձակ չափագիտություն
Թողունակություն	≥ 4 kHz, հակաալիասինգային	առանցքակալի ստորագրությունը 1–4 kHz տիրույթում է
Միջավայր	0–70 °C, 24 V սնում, յուղոտ, էլմագ. խանգարումներ հաճախակարգավորիչից	շարժիչի իրական պահարանը
Ելք	RMS + սպեկտր, 1 Hz, ժամանականիշ ±1 ms	որպեսզի հաճախությունը հաշվարկելի լինի

Յոթ տող: Ահա՛ արդյունքը — ոչ թե սարքի կոդը:

Ձեր հերթն է

Չորս որպես, զույգերով — գրե՛ք յոթ տողը

«Դրոնը շարունակ վեր-վար է գնում։ Արե՛ք, որ բարձրությունը նորմալ պահի»։

Սկսե՛ք այստեղից	Դժվարը	Թակարդը
Ո՞րն է ֆիզիկական մեծությունը Հավանաբար բարձրությունը չէ։	Ի՞նչ թողունակություն։ Որքա՞ն արագ է իրականում փոխվում դրոնի բարձրությունը	Ո՞րն է ՏԻՐՈՒՅԹԸ — և արդյոք նույնն է, ինչ անհրաժեշտ ԼՈՒԾՈՒՆԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

Յոթ տողն ամբողջությամբ չեք ավարտի։ Երեքը ճի՛շտ արեք։

Առանցքակալի վնասվածքի էներգիան հայտնվում է 1–4 kHz տիրույթում: Բնութագրի ո՞ր մեկ տողն է որոշում՝ ընդհանրապես կաշխատի՞ ձեր համակարգը

A Չափման լրիվ տիրույթ ≥ ±16 g

B Թողունակություն ≥ 4 kHz, նմուշառում ≥ 8 kHz, հակաալիասինգային ֆիլտրով

C Լուծունակություն ≤ 0.1 mg

D Աշխատանքային ջերմաստիճան մինչև 85 °C

Այս չորսից ամեն մեկը իրական պահանջ է: Միայն մեկը, սխալ լինելու դեպքում, համակարգը դարձնում է անկարող, ոչ պարզապես անկատար:

Առանցքակալի վնասվածքի էներգիան հայտնվում է 1–4 kHz տիրույթում: Բնութագրի ո՞ր մեկ տողն է որոշում՝ ընդհանրապես կաշխատի՞ ձեր համակարգը

A Չափման լրիվ տիրույթ ≥ ±16 g

B **Թողունակություն ≥ 4 kHz, նմուշառում ≥ 8 kHz, հակաալիասինգային ֆիլտրով**

C Լուծունակություն ≤ 0.1 mg

D Աշխատանքային ջերմաստիճան մինչև 85 °C

Ա, Գ և Դ-ն իրական պահանջներ են — սխալվեք, և համակարգը կլինի անկատար: Սխալվե՛ք Բ-ում, և համակարգը կլինի կո՛ւյր:

Կիսամյակային նախագիծը

Առաջին արդյունքը՝ մինչև 3-րդ դասախոսությունը

ԻՆՉ ԿԿԱՌՈՒՑԵՔ

Բազմատվիչ ներդրված համակարգ, որը չափում է իրական մեծություն՝ ստուգաչափված, ֆիլտրված, ժամանականիշով, վալիդացված հայտարարված պահանջների

ԱՐԴՅՈՒՆՔ 1 · ՄԵԿ ԷՋ

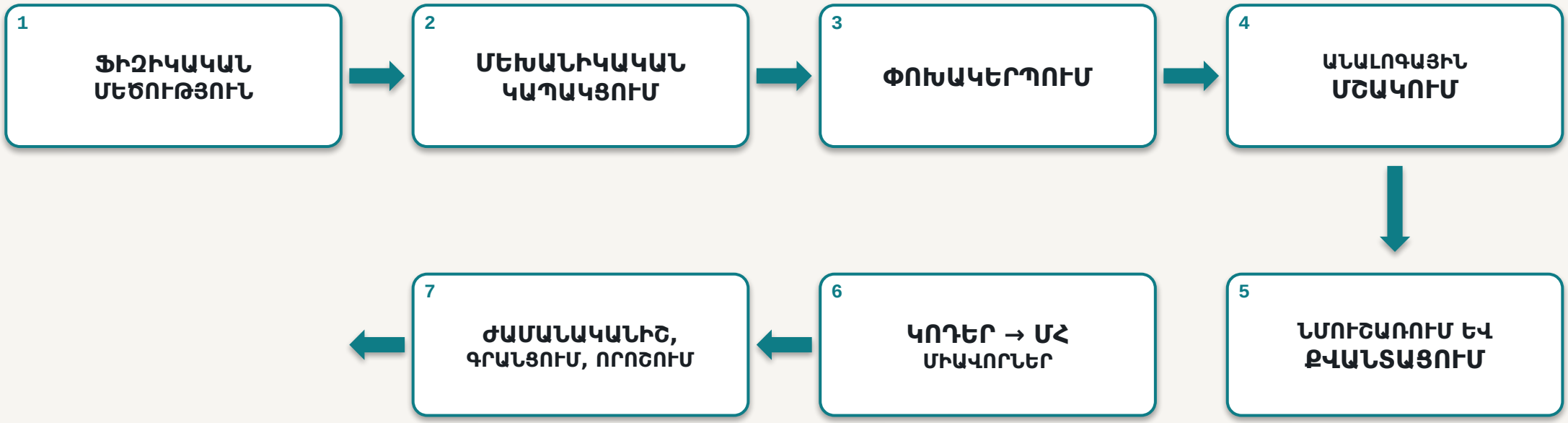
Յոթ բնութագրային տողերը՝ ձեր ընտրած չափման խնդրի համար։

Ոչ մի սարքի կոդ։ Ոչ սխեմա։ Ոչ ծրագիր։ Միայն յոթ տողը — յուրաքանչյուրը իր արժեքի հիմնավորմամբ։

2–3 հոգանոց խմբեր։ Նույն խմբերը, ինչ լաբորատորիայում։ Ընտրե՛ք ձեր չափվող մեծությունը այս շաբաթ։

Վերադառնանք շարժիչին

Մինչ ասեմ — որոշե՛ք, ֆիզիկապես



Մատը դրե՛ք այն վանդակի վրա, որտեղ հիմա կարծում եք՝ սա ձախողվեց: Բոլորը: Ես նայում եմ:

Հետագա քննության երեք թիվը

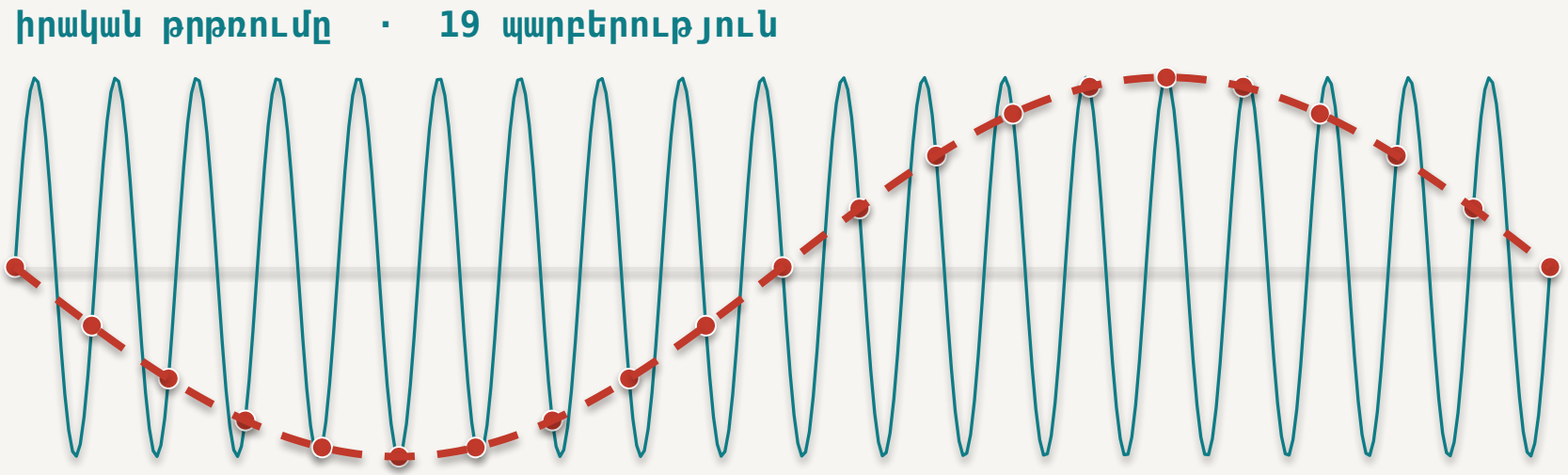
1520 Hz	100 Hz	ոչ մի
առանցքակալի վնասվածքի ստորագրությունը	նմուշառման հաճախությունը, որ ինչ-որ մեկն ընտրել է	տեղադրված հակաալիասինգային ֆիլտր

100 Hz նմուշառման դեպքում 50 Hz-ից վեր ամեն ինչ ծալվում է շերտի ներս —
և քանի որ ԱԹԿ-ից առաջ ֆիլտր չկար, ոչինչ չէր կանգնեցնում այն:

Նայքվիստ. 1520 Hz տեսնելու համար պետք է նմուշառել 3040 Hz-ից վեր: Նրանք նմուշառել են 30 անգամ դանդաղ:

Որտեղից եկավ 20 Hz գիծը

Գծված է 19 պարբերություն 20 նմուշի դիմաց, որ տեսանելի լինի — շարժիչի հարաբերությունն էր 1520:100, նույն թվաբանությունը



կարմիր կետերը =
միայն այն պահերը, երբ ԱԹԿ-ն նայել է

| 1520 - 15x100 |
= 20 Hz

Հսկիչը ճշգրտորեն ցույց էր տալիս առանցքակալի քայքայումը՝ պիտակավորված որպես բեռի դանդաղ փոփոխություն:

Ոչինչ խափանված չէր։
Ամեն մասը համապատասխանում էր բնութագրին։
Համակարգը երբեք բնութագրված չէր։

Ալիասինգը անվերադարձ է։ Ոչ մի հետագա ֆիլտր, ոչ խելացի ծրագիր, ոչ մեքենայական ուսուցում չի վերականգնի հաճախությունը, որը չեք նմուշառել։

Ինչը բացակայում էր

Մեկ տող, մեկ փաստաթղթում, որը ոչ ոք չգրեց

```
Թողունակություն.  ≥ 4 kHz, հակաալիասինգային.
Նմուշառում.  ≥ 8 kHz:
```

Մեկ տող: Մեկ շարժիչ:

Սա նաև ձեր պատասխանն է 4-րդ հարցմանը — տարբերակ Բ: Եվ սա հենց այն բնութագրային տողն է, որը ձեզ խնդրեցի գրել տասնհինգ րոպե առաջ:

3-րդ դասախոսությունը այն մասին է, թե ինչպես այդ տողը դառնում է ԱԹԿ-ի կարգավորում: 2-րդ լաբորատորիայում ալիասինգը կստեղծեք ձեր ձեռքերով:

Չորս բան՝ հիշելու

01 **Չափումը շղթա է, և այն սկսվում է տվիչից առաջ։**
Պտուտակը, ամրակն ու իրանը ձեր չափիչ սարքի մասն են։

02 **Որոշ կորուստներ անվերադարձ են։**
Ալիասինգը և բացակայող ժամանականիշը հետագայում ուղղելի չեն։

03 **Սարքի փոքրացումը փոխզիջում է, ոչ բարելավում։**
$k \propto L$, $m \propto L^3$, $f_0 \propto 1/L$ — թողունակությունը վեր, աղմուկի հատակն էլ վեր։

04 **Տեխնիկական բնութագիրն է արդյունքը։**
Յոթ տող, յուրաքանչյուրը հիմնավորմամբ։ Սարքերի կոդերը գալիս են հետո։

Ելքի տոմս

Անանուն։ Հանձնե՛ք դռան մոտ — երկու մասն էլ։

1 · ՄԵԿ ԲՆՈՒԹԱԳՐԱՅԻՆ ՏՈՂ

Դրոնը պետք է բարձրությունը պահի ±0.5 մ ճշտությամբ։

Գրե՛ք ՄԵԿ բնութագրային տող նրա ճնշման
տվիչի համար — այն տողը, որը պարծենալ եք
ամենակարևորն է, իր թվով։

2 · ԱՄԵՆԱԱՆՀԱՍԿԱՆԱԼԻ ԿԵՏԸ

Ո՞րն է այսօրվանից այն մեկ բանը, որում
ամենաքիչ վստահ եք

Մեկ նախադասություն։ Երեք ամենահաճախ
հանդիպողին կպատասխանեմ 2-րդ
դասախոսության սկզբում։

Այս դասընթացը դասավանդվում է առաջին անգամ։ Ձեր անհասկանալի կետերը իրապես փոխում են այն, ինչ տեղի կունենա հաջորդ շաբաթ։

2-րդ շաբաթ. Լաբորատորիա 1

Datasheet-ից տվյալ — և այո, դա տեսությունից առաջ է

Լաբորատորիայում դուք	Շղթայի որ փուլը
Կկարդաք սնման և տրամաբանական մակարդակները datasheet-ից ՄԻՆՉ լարման միացումը	1-ին փուլից առաջ
Կմիացնեք մեկ I²C տվիչ Nucleo տախտակին՝ ձգող դիմադրություններով	փուլ 3 → 5
Կապացուցեք, որ սարքը հենց այն սարքն է (սարքի ID ռեգիստր)	փուլ 5
Կկարգավորեք չափման տիրույթը և ելքային տվյալների հաճախությունը	փուլ 5
Կվերածեք չմշակված լրացուցիչ կոդերը ՄՀ միավորների — ձեռքով	փուլ 6
Կապացուցեք, որ թիվը ճիշտ է. հանգստի վիճակում մեկ առանցքը պետք է ցույց տա ≈ 9.81 m/s²	փուլ 6

Ոչ մի ծրագրավորում: Տախտակները արդեն ծրագրավորված են — տվիչը կառավարում եք սերիական կոնսոլից:

Նախալաբորատոր թերթը արգելակ է. առանց ստորագրված նախալաբորատորի՝ լարում չկա:
Այն պարունակում է մեկ էջ I²C ներածություն և կոնսոլի ուղեցույցը — կարդացե՛ք մինչ երեքշաբթի:

Դասախոսություն 2

Տվիչների բնութագրերը և ընտրությունը datasheet-ի հիման վրա

Բերե՛ք նոութբուք կամ տպված datasheet։ Կգտնենք մի թիվ, որը որոշում է նախագիծը — և այն առաջին էջում չի լինելու։

ՄԻՆՉ ՀԱՋՈՐԴ ՇԱԲԱԹ

1 · Ձևավորող թեստ (6 հարց, առանց գնահատականի) — կտեղադրվի այսօր երեկոյան

2 · Նախալաբորատոր թերթ Լաբորատորիա 1-ի համար, ներառյալ I^2C ներածությունը

3 · Նախագծի արդյունք 1. ձեր յոթ բնութագրային տողերը

4 · Ընթերցանություն. Fraden, Handbook of Modern Sensors — գլ. 1–2