

Ա.Հ. ԲԱԼԱԲԱՆՅԱՆ

ԻՆՏԵԳՐԱԼ ՄԽԵՄԱՅԻ ՄՆՄԱՆ ԼԱՐՄԱՆ ՇԵՂՄԱՆ ՀԱՅՏՆԱԲԵՐՄԱՆ ԵՎ
ԳՆԱՀԱՏՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Առաջարկվում է անալոգաթվային համակարգ, որը ինտեգրալ սխեմայի աշխատանքի ողջ ընթացքում հայտնաբերում և գնահատում է սնման լարման արժեքի շեղման չափը և գեներացնում համապատասխան ազդանշան՝ վերագործարկելու համար չիպի ներքին դիմադրության կարգաբերման սխեմաները: Մնման լարման շեղված արժեքը համեմատվում է հենակային արժեքի հետ, որը համակարգի աշխատանքի ընթացքում անընդհատ փոխվում է և ընդունում համապատասխանաբար նախորդ կարգաբերման պահին եղած սնման լարման արժեքը: Սկզբնական պահի հենակային լարումը աշխատանքի մեկնարկային պահի ինտեգրալ սխեմայի սնման լարումն է:

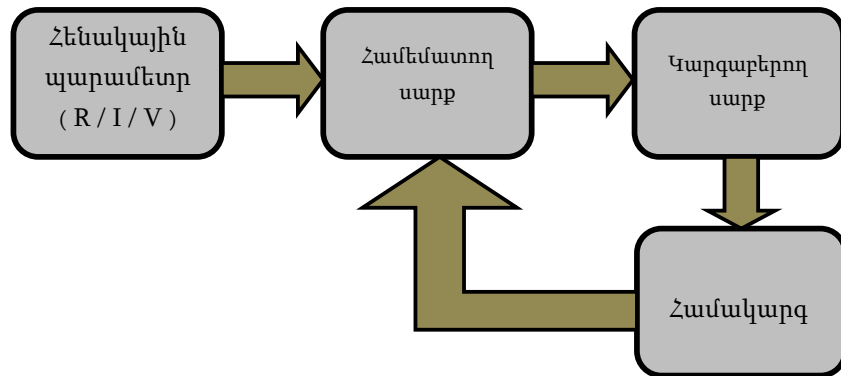
Առանցքային բառեր. ինտեգրալ սխեմա, դիմադրության կարգաբերում, սնման լարում, շեղման հայտնաբերում, մոդելավորում:

Ներածություն: Ինտեգրալ սխեմաների (ԻՄ) բաղադրիչների չափերի մասշտաբավորման և արագագործության աճին զուգահեռ մեծանում են դրանց պարամետրերի շեղումները արտաքին գործոնների (տեխնոլոգիական գործընթացի շեղումներ, լարման և ջերմաստիճանի տատանումներ) ազդեցությունից: Ժամանակակից ԻՄ աշխատանքային լարումները շատ ցածր են (0,8 % և ցածր) և համաչափելի են տարբեր պատճառներով առաջացած աղմուկներին: Ուստի սխեմայի բաղադրամասերի՝ կոդմակի ազդեցություններից հնարավորինս անկախ պարամետրերի ապահովումն անխուսափելի է և խիստ անհրաժեշտ:

Ժամանակակից ԻՄ ամենահատկանշական և անկայուն պարամետրերից է ՄՕԿ (մետաղ-օքսիդ-կիսահաղորդիչ) տեխնոլոգիայով իրականացվող ռեզիստորի դիմադրությունը: Նման ռեզիստորները ստացվում են ՄՕԿ տրանզիստորների միջոցով [1]: ՄՕԿ ռեզիստորի դիմադրության շեղումը տեխնոլոգիական գործընթացի, լարման և ջերմաստիճանի (*SGL*) փոփոխություններից կարող է հասնել մինչև 50% [2]:

Դիմադրության կայուն արժեքներ պահանջվում է ապահովել ԻՄ մի շարք հանգույցներում, ինչպիսիք են մուտք/ելք հանգույցների եզրային դիմադրությունները, որոնց առկայությունը անհրաժեշտ է փոխանցման գծերում ազդանշանների անդրադարձումներից խուսափելու համար [3]: Անդրադարձումները փոխանցման գծերում կարող են առաջացնել պատահական տրամաբանական սխալ փոխանջատումներ: Նշված երևույթի հետևանքով համակարգի ֆունկցիոնալությունը կարող է խափանվել աշխատանքային որոշ պայմաններում, ինչպիսիք են բարձր ջերմաստիճանները (100°С և բարձր) կամ սնման լարման շեղումները անվանական (նոմինալ) արժեքից:

ԻՄ դիմադրությունների շեղումների չափը գնահատելու և փոքրացնելու համար օգտագործվում են կարգաբերման սխեմաներ [2,4,5]: Կարգաբերման համար անհրաժեշտ պայման է որևէ հենակային պարամետրի առկայությունը, որի հետ համեմատման և կարգաբերման միջոցով դիմադրության մեծությունը բերվում է անվանական արժեքի (նկ. 1):



Նկ. 1. Կարգաբերման համակարգի կառուցվածքը

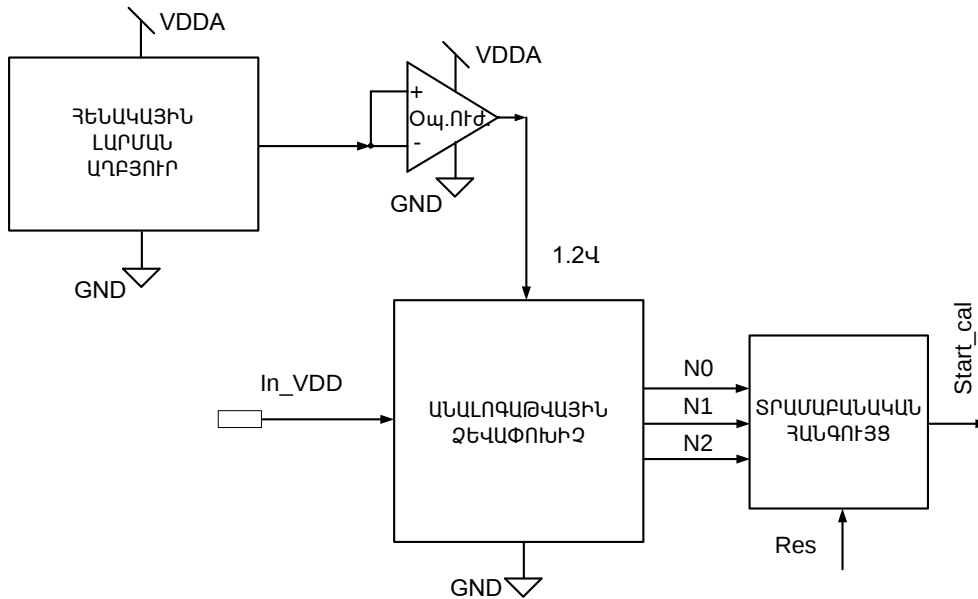
Գոյություն ունեն ՄՕԿ դիմադրության շեղման գնահատման և կարգաբերման մի շարք մեթոդներ, որոնց դեպքում օգտագործվում են հենակային տարբեր պարամետրեր: Ամենատարածված մեթոդներից մեկը արտաքին բարձր (0,01%) ճշտությամբ ռեզիստորի օգտագործմամբ կարգաբերումն է: Այս եղանակն ապահովում է մոտ 2% դիմադրության վերականգնում [4]: Մեկ այլ կարգաբերման համակարգում որպես հենակային պարամետր օգտագործվում է քվարցային գեներատորի հենակային տակտային ազդանշանի հաճախությունը (100 ՄՀց), որն առկա է ժամանակակից գրեթե բոլոր ԻՄ-երում [2]: Գոյություն ունեն նաև համակարգեր, որտեղ դիմադրության կարգաբերման համար որպես հենակային պարամետր օգտագործվում է հենակային լարման աղբյուրի լարումը [5]:

Ներկայումս կիրառվող ԻՄ-երում սովորաբար դիմադրությունը կարգաբերվում և դիմադրության անվանական արժեք է հաստատվում սխեմայի աշխատանքի մեկնարկային պահին, որից հետո ԻՄ-ն անցնում է նորմալ աշխատանքային ռեժիմի: Դա կարող է հանգեցնել դիմադրության անվանական արժեքից զգալի շեղման՝ ՏԳԼՋ փոփոխության արդյունքում: Կարգաբերման ավարտից հետո կարգաբերման համակարգն անջատվում է: ԻՄ հետագա աշխատանքի ընթացքում նրա աշխատանքային ջերմաստիճանը, ինչպես նաև սնման լարման արժեքը զգալիորեն կարող են փոխվել: Հետևաբար, ԻՄ աշխատանքի մեկնարկային պահին դիմադրության կարգաբերված արժեքը նույնպես կարող է էապես փոխվել:

ԻՄ վերոնշյալ թերությունը վերացնելու համար մշակվել է մի համակարգ, որը ԻՄ աշխատանքի ողջ ընթացքում գնահատում է սնման լարման շեղման աստիճանը՝

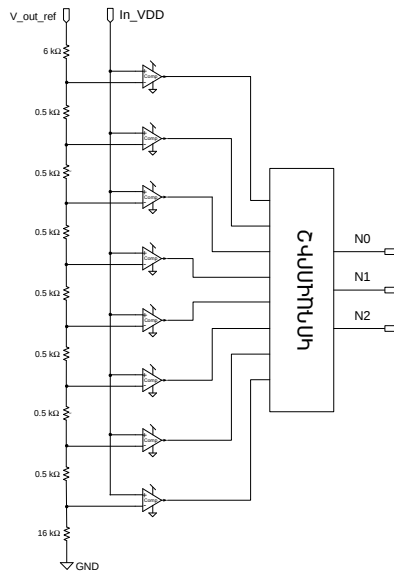
անհրաժեշտության դեպքում դիմադրության կարգաբերման սխեման կրկին մեկնարկելու և դիմադրության արժեքը անվանականին վերադարձնելու համար:

Մշակված համակարգի ճարտարապետությունը: ԻՄ սնման լարման շեղումը հայտնաբերող և գնահատող մշակված համակարգը բաղկացած է անալոգային և թվային հանգույցներից (նկ. 2):



Նկ. 2. ԻՄ սնման լարման շեղումը հայտնաբերող և գնահատող համակարգ

Սնման լարման շեղումը հայտնաբերվում է անալոգային հանգույցի միջոցով, իսկ համեմատումը անվանական արժեքի հետ՝ թվայինով: ԻՄ մեկնարկման պահին եղած սնման լարման արժեքը համարվում է հենակային, և այդ պահի ԳԼՋ պայմանների համար կատարվում է դիմադրության առաջին կարգաբերումը: ԻՄ հետագա աշխատանքի ընթացքում շեղված սնման լարումը համեմատվում է նախորդ կարգաբերման պահի սնման լարման արժեքի հետ տրամաբանական թվային հանգույցում՝ երկուական կոդերի տեսքով: Սնման լարման սկզբնական արժեքը անալոգա-թվային ձևափոխիչով (ԱԹՉ) փոխակերպվում է երկուական կոդի և ինտեգրալ սխեմայի հետագա աշխատանքի ընթացքում պահպանվում է հիշող ռեգիստրում, որը տրամաբանական թվային հանգույցի մաս է կազմում (նկ. 2): Երբ սնման լարումը շեղվում է հենակային արժեքից, փոխվում է նաև ԱԹՉ-ի [6] (նկ. 3) ելքային երկուական կոդը: Եթե հենակային կոդի հետ համեմատման արդյունքում լինում է տարբերություն, տրամաբանական հանգույցը ձևավորում է ելքային Start_cal ազդանշան, որը կրկին մեկնարկում է կարգաբերման համակարգերը՝ դիմադրության արժեքը դարձյալ անվանականին վերադարձնելու համար:



Նկ. 3. Անալոգաթվային ձևափոխիչի սխեման

Սնման լարման շեղումը հայտնաբերելու նպատակով անհրաժեշտ է, որ ԱԹՁ-ն լինի հնարավորինս անկախ սնման լարման և ջերմաստիճանի փոփոխություններից: Այդ պատճառով առաջարկվող սխեմայում որպես ԱԹՁ-ի սնման լարում օգտագործվել է հենակային լարման աղբյուրի ելքային լարումը, որը սնման լարման, ջերմաստիճանի և տեխնոլոգիական գործընթացի բոլոր հնարավոր շեղումների ընթացքում ապահովում է 1,2 Վ լարում (V_{out_ref})՝ առավելագույնը 2,1% շեղումով [7]:

Օպերացիոն ուժեղարարը մշակված համակարգում օգտագործվում է որպես կրկնիչ և նախատեսված է հենակային լարման աղբյուրի ելքային լարումն ուժեղացնելու և ԱԹՁ-ն սնելու համար: Օպերացիոն ուժեղարարի շեղումները ԳԼՋ տատանումների նկատմամբ անհամեմատ փոքր են, և նրա ազդեցությունը համակարգի աշխատանքի վրա կարելի է անտեսել [8]: Օպերացիոն ուժեղարարի և հենակային լարման աղբյուրի սնման լարման անվանական արժեքը 1,8 Վ է:

ԱԹՁ-ի դիմադրությունների արժեքներն ընտրված են այնպես, որ համեմատիչների բացասական մուտքերում որպես հենակային լարում ստացվեն դիտարկվող սնման լարման (In_VDD) առավելագույն շեղումներին շատ մոտ լարումներ: Դիտարկվող սնման լարման անվանական արժեքը 0,85 Վ է, որը կարող է աշխատանքի ընթացքում ունենալ $\pm 10\%$ շեղում և տատանվել (0,765 ... 0,935 Վ) միջակայքում: Համեմատիչների մյուս մուտքային լարումները նույնպես ընկած են այս միջակայքում, ինչը կարևոր պայման է համակարգի ճշտությունը մեծացնելու համար: Նախագծված ԱԹՁ-ի ելքային կոդը փոխվում է 1 բիթով, երբ In_VDD սնման լարումը ենթարկվում է մոտ 25 μV շեղման:

Նախագծված հենակային լարման աղբյուրի սխեմայի հիմքում ընկած է դասական հենակային լարման աղբյուրի ճարտարապետությունը, որտեղ հենակային լարումը ստեղծվում է երկբևեռ տրանզիստորների միջոցով (նկ. 4): Հենակային լարումը ներկայացնում է երկու լարումների գումար. երկբևեռ տրանզիստորի V_{pt} լարումը հակադարձ համեմատական է ջերմաստիճանին, իսկ երկու երկբևեռ տրանզիստորների V_{pt} լարումների տարբերությունը ուղիղ համեմատական է ջերմաստիճանին:

Նախագծված սխեման տիպային հենակային լարման աղբյուրի համեմատ շատ ավելի ճշգրիտ է [7], որը պայմանավորված է նրանով, որ սխեմայի ճյուղերով հոսանքը հոսում է ոչ թե մեկական UOY տրանզիստորներով, այլ՝ կասկոդային տրանզիստորներով (կասկոդային միացման դեպքում տրանզիստորի հոսքուղու մոդուլյացիայի երևույթը շատ փոքր է, և այն կարելի է անտեսել):

Առաջին ճյուղի երկբևեռ տրանզիստորը ներկայացնում է 8 զուգահեռ միացված երկբևեռ տրանզիստորներ ($N = 8$): Օպերացիոն ուժեղարարի մուտքային լարումները պետք է լինեն հավասար, ինչն իրականացվում է բացասական հետադարձ կապի շնորհիվ՝ օպերացիոն ուժեղարարի ելքը հոսանքի աղբյուր հանդիսացող տրանզիստորներին միացնելով: Հենց ուժեղարարի ելքն էլ այդ տրանզիստորի կառավարող լարումն է: Հենակային լարման աղբյուրի երկբևեռ տրանզիստորներ պարունակող ճյուղերին միացված են օպերացիոն ուժեղարարի մուտքերը, որոնցում հավասար լարումներ ստանալու համար անհրաժեշտ է, որ բացասական հետադարձ կապը գերակշռի դրական հետադարձ կապին: Ճյուղերից մեկով հոսող հոսանքը հավասար է $VTlnn/R1$, և քանի որ երկու ճյուղերի UOY տրանզիստորները միանման են, ապա նույն հոսանքը կհոսի նաև սխեմայի երկրորդ ճյուղով՝ $R2$ դիմադրության վրա ստեղծելով լարման անկում, որն ուղիղ համեմատական է բացարձակ ջերմաստիճանին և հավասար է $(R2/R1)VTlnn$: Ինչպես հայտնի է, V_{pt2} լարումը հակադարձ համեմատական է բացարձակ ջերմաստիճանին, հետևաբար՝ այս երկու լարումների գումարը կներկայացնի հենակային լարում, որը գրեթե կախված չէ բացարձակ ջերմաստիճանի փոփոխությունից:

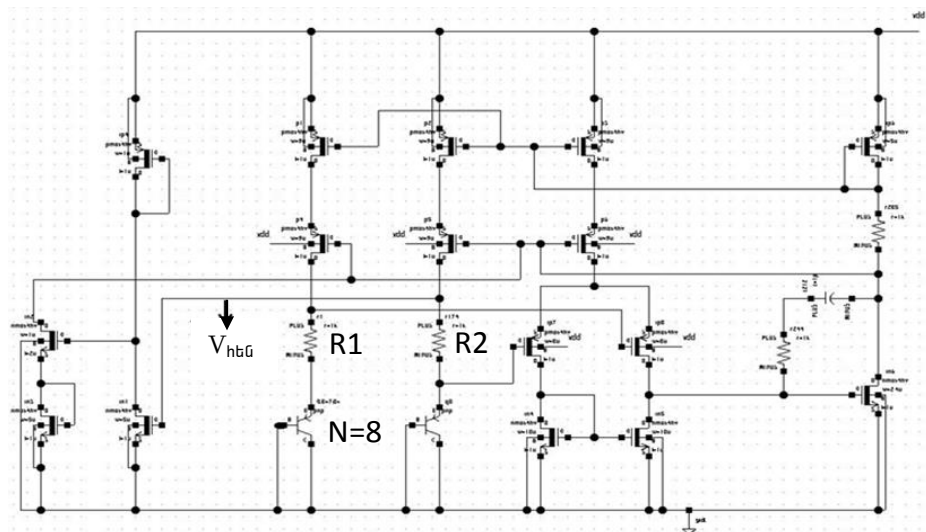
$$V_{hkn} = V_{pt2} + (R2/R1)VTlnn: \quad (1)$$

Նորմալ պայմաններում 1,2 φ հենակային լարում ստանալու դեպքում [9]՝

$$V_{hkn} = V_{pt2} + 17,2 VT: \quad (2)$$

Այսպիսով, նախատեսված արդյունք ստանալու համար անհրաժեշտ է բավարարել հետևյալ պայմանը՝

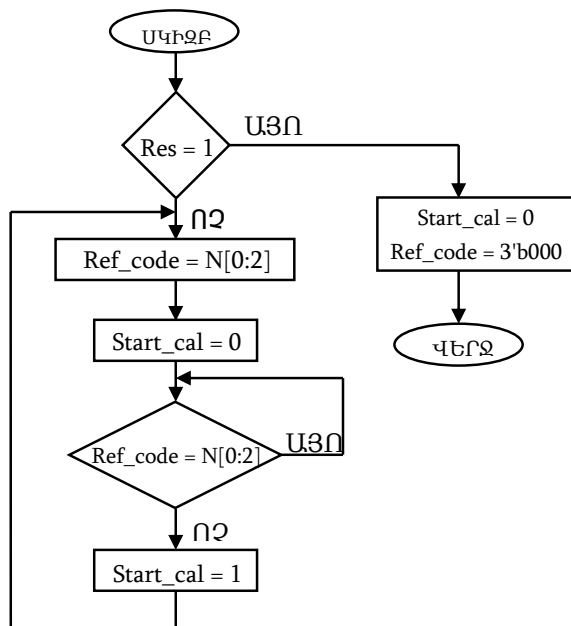
$$(R2/R1)lnn = 17,2: \quad (3)$$



Նկ. 4. Հենակային լարման աղբյուր

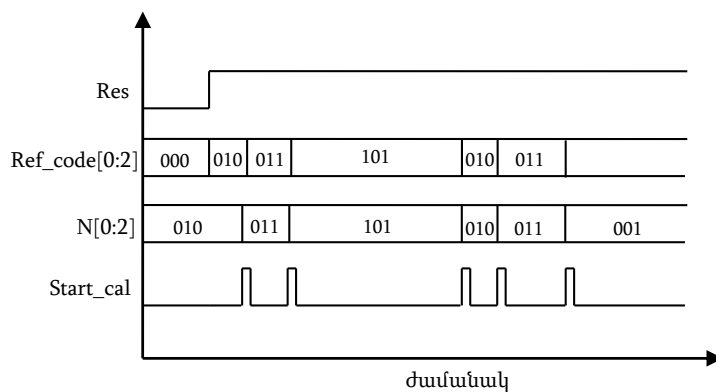
Սնման լարման շեղման հայտնաբերման մեխանիզմը: Առաջարկվող մեթոդը հնարավորություն է ընձեռում հայտնաբերել սնման լարման անգամ փոքր շեղումները և վերագործարկել ԻՍ առկա դիմադրության կարգաբերման սխեմաները՝ լարման փոփոխման պատճառով դիմադրության արժեքը նոմինալին վերադարձնելու համար: Համակարգում անալոգային սնման լարումը ԱԹՁ-ի միջոցով փոխակերպվում է 3-բիթ թվային կոդի, որը տրամաբանական հանգույցը համեմատում է ԻՍ մեկնարկային պահին եղած կոդի հետ և անհավասարության դեպքում ձևավորում կարգաբերման համակարգերի վերագործարկման Start_cal ազդանշան (նկ. 5):

Երբ համակարգը գրոյացնող Res ազդանշանը ակտիվ է՝ $Res = 1$, ուրեմն համակարգն անջատված է և գտնվում է ոչ աշխատանքային ռեժիմում: Այս դեպքում ելքային Start_cal և սնման լարման սկզբնական կոդը պահպանող Ref_code ռեգիստրի արժեքները հավասար են 0-ի: Երբ Res ազդանշանը ակտիվ չէ և հավասար է 0-ի, տրամաբանական հանգույցը հիշում և պահպանում է ԱԹՁ-ի ելքային կոդը (N): Աշխատանքի ողջ ընթացքում կատարվում է տվյալ պահի ելքային N[0:2] կոդի և հենակային Ref_code ռեգիստրի արժեքների համեմատում: Եթե առկա է թեկուզ 1 բիթի տարբերություն, ապա համակարգը ձևավորում է Start_cal ազդանշանի դրական իմպուլս և կրկին շարունակում ԱԹՁ-ի ելքային N[0:2] կոդի և հենակային Ref_code կոդի համեմատումը, որը շարունակվում է ԻՍ աշխատանքի ողջ ընթացքում: Որպես հենակային կոդ հանդիսանում է վերջին կարգաբերման պահին ԱԹՁ-ի ելքային կոդը, որը գրանցվում է Ref_code ռեգիստրում Start_cal ազդանշանի դրական իմպուլսով:



Նկ. 5. Սնման լարման շեղման հայտնաբերման մեխանիզմը

Նկ. 6-ում բերված է տրամաբանական հանգույցի ժամանակային պարզեցված դիագրամը՝ հիմնված սնման լարման շեղման հայտնաբերման մեխանիզմի վրա, որտեղ Res-ը տրամաբանական թվային հանգույցը զրոյացնող ազդանշանն է, Ref_code-ը՝ նախորդ կարգաբերման պահին սնման լարման արժեքին համապատասխանող 3-բիթ կոդը պահպանող ռեգիստրը, N-ը՝ ԱԹՁ-ի ելքային 3-բիթ կոդը (արժեքները ժամանակային դիագրամում ընտրված են պատահականորեն), իսկ Start_cal-ը՝ համակարգի ելքային ազդանշանը, որի դրական իմպուլսների միջոցով վերագործարկվում է դիմադրության կարգաբերման համակարգը:



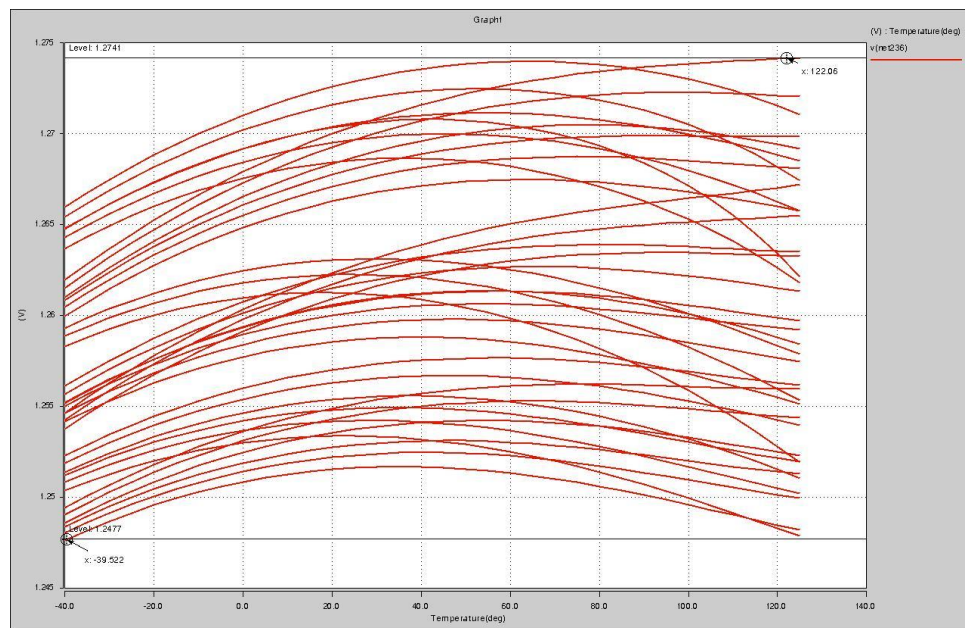
Նկ. 6. Տրամաբանական հանգույցի ժամանակային պարզեցված դիագրամը

Մոդելավորման արդյունքները: Համակարգի աշխատանքի մոդելավորումն իրականացվել է 28 նմանապատկերական գործընթացի համար Hspice ծրագրային գործիքով [10]: Մոդելավորման արդյունքները ցույց են տալիս, որ դիտարկվող In_VDD սնման լարման արժեքի դեպքում ԱԹՁ-ի ելքային կոդը չի փոփոխվում: Դա կատարվում է համակարգում օգտագործված 2,1% ճշտությամբ (4) հենակային լարման աղբյուրի միջոցով:

$$\Delta = \frac{V_{\text{max}} - V_{\text{min}}}{V_{\text{min}}} \cdot 100\% = \frac{1,2741 - 1,2477}{1,2477} \cdot 100\% \approx 2,1: \quad (4)$$

Հենակային լարման աղբյուրի աշխատանքը մոդելավորվել է շուրջ 40 դեպքերում՝ հաշվի առնելով բոլոր հնարավոր SGLQ պայմանները: Հենակային լարումը առավելապես կախված է ջերմաստիճանից, և այդ կախվածությունը բերված է նկ. 7-ում:

Կայուն սնման լարման շնորհիվ ԱԹՁ-ի համեմատիչների շեղումը այնքան փոքր է, որ դա չի հանգեցնում սխալ փոխանջատման:



Նկ. 7. Հենակային լարման կախվածությունը ջերմաստիճանից ԳԼՁ 39 դեպքերում

Նկ. 8-ում բերված են ԱԹՁ-ի ելքային կոդը պատկերող ազդանշանները մուտքային In_VDD սնման լարման արժեքի հնարավոր ողջ տիրույթում (0,765 ... 0,935 Վ):

Նկ. 8-ից պարզ է, որ ելքային երկուական կոդը պարունակում է հնարավոր բոլոր կոմբինացիաները մուտքային լարման փոփոխման նշված տիրույթում: ԱԹՁ-ի ելքային երկուական կոդերի 1-բիթ տարբերությանը համապատասխանող լարման առավելագույն արժեքը որոշում է սարքի ճշտությունը: N2 ազդանշանից ակնհայտ է դառնում,

Աղյուսակում ներկայացված են ԱԹՁ-ի ելքային կողերը և դրանց համապատասխանող մուտքային In_VDD սնման լարման արժեքների տիրույթները՝ ըստ նկ. 8-ում բերված ազդանշանների: Երկու հարևան կողերին համապատասխանող մուտքային լարումների միջև գոյություն ունի անցումային տիրույթ, որը կազմում է 5 մՎ:

ԱԹԶ-ի մուտքային և ելքային ազդանշանների արժեքները

In_VDD (Վ)	N [0:2]	$\Delta \text{In_VDD}$ (մՎ)	Անցումային տիրույթ (մՎ)
0.765 ... 0.775	000	10	5
0.780 ... 0.795	001	15	5
0.800 ... 0.820	010	20	5
0.825 ... 0.845	011	20	5
0.850 ... 0.870	100	20	5
0.875 ... 0.890	101	15	5
0.895 ... 0.915	110	20	5
0.920 ... 0.935	111	15	5

333

Առաջարկված մեթոդն իրականացվում է 3 հիմնական փուլերով.

1. Սկզբնական պահի հենակային լարումը աշխատանքի մեկնարկային պահի ինտեգրալ սխեմայի սնման լարումն է:

2. Սնման լարման շեղված արժեքը համեմատվում է հենակային արժեքի հետ, որը համակարգի աշխատանքի ընթացքում անընդհատ փոխվում է և ընդունում համապատասխանաբար նախորդ կարգաբերման պահի սնման լարման արժեքը:

3. Համակարգում տեղի է ունենում ելքային ազդանշանի փոխանջատում, երբ թվային հանգույցը հայտնաբերում է անալոգաթվային ձևափոխիչի ելքային կոդի 1—բիթ տարբերությունը, որը համապատասխանում է դիտարկվող սնման լարման արժեքի առավելագույն 25 μ V շեղմանը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. MOS Characteristics and a Modified Linear MOS Resistor / **K. Balasubramanian, K. Vineeth, et al** // IEEE International Conference for Technical Postgraduates.- December 14-15, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009.- P. 1-4.
2. **Melikyan V., Balabanyan A., Hayrapetyan A., Durgaryan A.** NMOS/PMOS Resistance Calibration Method Using Reference Frequency // Conference on Computer Science and Information Technologies.- Yerevan, Armenia, September 23-27, 2013.- P. 352-355.
3. **Zolog M., Pitică D.** Analysis of the effect of nonlinear input/output characteristics of digital integrated circuits on signal integrity // IEEE 31st International Spring Seminar on Electronics Technology.- Budapest, 2008.- P. 604-609.
4. Receiver/Transmitter Input/Output Termination Resistance Calibration Method / **V. Melikyan, A. Balabanyan, et al** // IEEE XXXIII International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology.- Kyiv, Ukraine, 2013, April 16-19.- P. 126-130.
5. Process and Temperature Compensation in a 7-MHz CMOS Clock Oscillator / **K. Sundaresan, Ph. Allen, et al** // IEEE Journal of Solid-State Circuits. February 2006.-Vol. 41, No. 2.- P. 433-442.
6. **Baker J.** CMOS Circuit design, layout and simulation. -2008. - 1045 p.
7. **Melikyan V., Balabanyan A., Durgaryan A., Babayan E.** Decreasing Frequency Variation in High-Speed Ring Oscillator Using Bandgap Reference // XXXII International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology.- Kyiv, Ukraine, April 10-12, 2012.- P. 79-80.
8. Performance Evaluation of a 32-nm CNT-OPAMP: Design, Characteristic Optimization and Comparison with CMOS Technology / **F. Rahman, et al** // IEEE 14th International Conference on Computer and Information Technology.- Dhaka, Bangladesh, December 22-24, 2011.- P. 583-588.
9. **Razavi B.** Fundamentals of Microelectronics. -2006. - 833 p.
10. Hspice Application Manual, Synopsys Inc. -2010. - 196 p.

ՀՊՃՀ (ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿ): Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 28.12.2013:

А.Г. БАЛАБАНЯН

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ**

Предложена аналого-цифровая система, которая обнаруживает и оценивает размер колебания напряжения питания во время работы интегральной схемы и генерирует соответствующий сигнал для перезагрузки схем калибровки сопротивления. Измененное напряжение питания сравнивается с опорным значением, которое постоянно меняется во время работы системы и принимает значение, соответствующее напряжению питания при предыдущей калибровке. В первый момент опорное напряжение является напряжением питания при запуске интегральной схемы.

Ключевые слова: интегральная схема, калибровка сопротивления, напряжение питания, обнаружение отклонения, симуляция.

A.H. BALABANYAN

**DEVELOPING A SYSTEM FOR DETECTING AND ESTIMATING THE SUPPLY
VOLTAGE DEVIATION OF AN INTEGRATED CIRCUIT**

An analog-to-digital system detecting and estimating the size of variation of the supply voltage value at the integrated circuit operation, and generating an appropriate signal for restarting the internal resistance calibration circuits is proposed. The changed supply voltage is compared with the reference value which is changed during the operation and is equal to the supply voltage value respectively at previous calibration. At the first moment, the reference voltage is the supply voltage at the integrated circuit startup.

Keywords: integrated circuit, resistance calibration, supply voltage, deviation detection, simulation.