

**Ձ.Մ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ**

**ՍԻՆՔՐՈՆԱՑՆՈՂ ՍԱՐՔԵՐՈՒՄ ՄԵՏԱԿԱՅՈՒՆ ՎԻՃԱԿԻ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ  
ՉԱՓՄԱՆ ԵՎ ԽԱՓԱՆՈՒՄՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԸՆԿԱԾ ԺԱՄԱՆԱԿԱՀԱՏՎԱԾԻ  
ՀԱՇՎԱՐԿԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՎԱԾ ՀԱՄԱԿԱՐԳ**

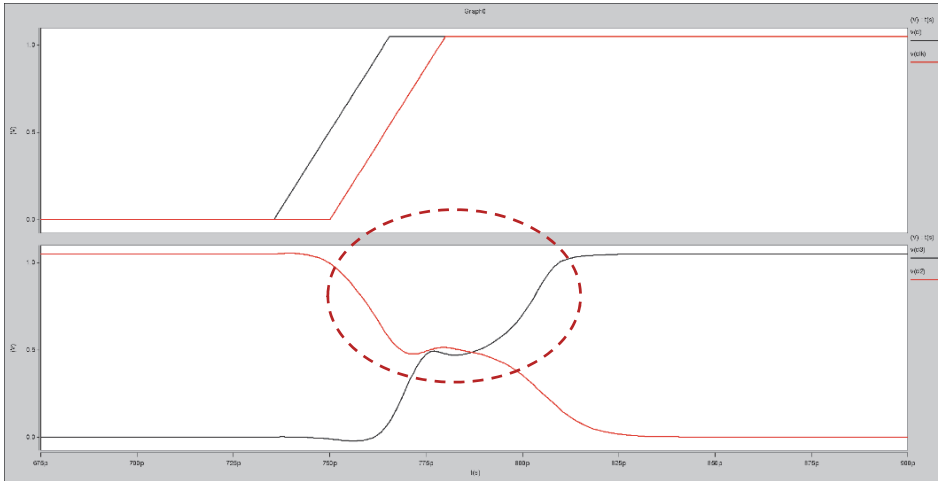
Ժամանակակից տեխնոլոգիաների զարգացմանը զուգընթաց՝ ավելանում է բյուրեղի վրայի համակարգերում բազմասինքրոազդանշանային հանգույցների օգտագործումը: Դրանք օգնում են միմյանց հետ համատեղել մի շարք սխեմաների աշխատանքները, սակայն հանգեցնում են խնդիրների, որոնցից է տարբեր սինքրոազդանշանային տիրույթներում ձևավորվող ազդանշանների համապատասխանեցումը: Այդ խնդիրը լուծելու համար կիրառվում են սինքրոնացնող սխեմաներ, որոնցում առկա է մետակայուն վիճակում հայտնվելու հավանականությունը, որը կարող է հանգեցնել սխեմայի աշխատանքի խափանմանը:

Ուսումնասիրվել են սինքրոնացնող սխեմաներում մետակայուն վիճակի պարամետրերի չափման և խափանումների միջև ընկած ժամանակահատվածի հաշվարկի եղանակները: Առաջարկվել է ավտոմատացված համակարգ, որը կօգնի նախագծողին գերմեծ ինտեգրալ սխեմայի աշխատանքի ստուգման ընթացքում հեշտությամբ կատարել վերոնշյալ պարամետրերի չափումներն ու հաշվարկները:

**Առանցքային բաներ.** բազմասինքրոազդանշանային գերմեծ ինտեգրալ սխեմա, մետակայունություն, ժամանակային հաստատուն, ավտոմատացված համակարգ:

**Ներածություն.** Մեկից ավելի սինքրոազդանշանային տիրույթներ ունեցող բյուրեղի վրա զետեղված համակարգերում առաջանում է սինքրոնացնող սխեմաների կիրառության անհրաժեշտություն, որի պարզագույն օրինակ է D-տրիգերների համակցությունը [1]: Քանի որ սինքրոազդանշաններն աշխատում են միմյանցից անկախ, հետևաբար՝ չի կարելի կանխատեսել ընդունող հանգույցում այլ սինքրոազդանշանով ձևավորված ազդանշանի փոփոխության ժամանակը: Սինքրոնացնող սխեմայում տվյալը կարող է փոփոխվել սինքրոազդանշանին զուգընթաց, որը կարող է հանգեցնել սինքրոնացնող սխեմայում մետակայուն վիճակի առաջացման (նկ.1):

Սինքրոնացնող սխեմայի՝ մետակայուն վիճակում հայտնվելն ու այդ վիճակից դուրս գալը որոշ չափով պատահական երևույթներ են և հիմնված են մաթեմատիկական հաշվարկների վրա, որոնց հիման վրա հաշվվում է խափանումների միջև ընկած ժամանակահատվածը (ԽՄԸԺ) [2]:



Նկ. 1. Մետակայուն վիճակ

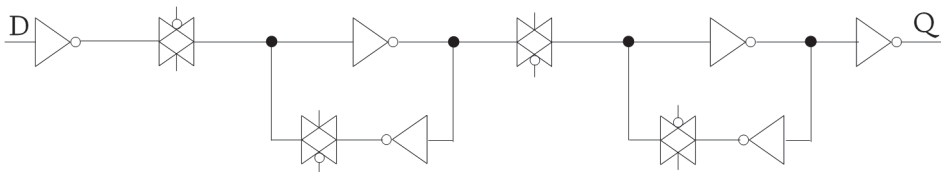
**Խնդրի դրվածքը և մեթոդիկայի հիմնավորումը.**

- Սինթրոնացնող սխեմաներում մետակայուն վիճակի պարամետրերի չափումների եղանակների հետազոտումը:

- Սինթրոնացնող սխեմաներում ԽՄԸԺ-ի հաշվարկի մեթոդների հետազոտումը:

- Սինթրոնացնող սխեմաներում մետակայուն վիճակի պարամետրերի չափումների և ԽՄԸԺ-ի հաշվարկի ավտոմատացված համակարգի մշակումը:

**Հետազոտության արդյունքները.** Բոլոր հետազոտությունները կատարվել են D-տրիգերի վրա (նկ.2) [3] որպես սինթրոնացնող սխեմա: Մոդելավորումները կատարվել են HSPICE ծրագրային գործիքով՝ օգտագործելով saed32/28-ն տեխնոլոգիայի գրադարանները:



Նկ. 2. D-տրիգեր

**Տեղակայման և պահպանման ժամանակների չափումը.** Տրիգերի անխափան աշխատանքը ապահովելու համար գրանցման ժամանակ պետք է պահպանել տեղակայման և պահպանման ժամանակները: Այդ ժամանակային սահմանափակումներին չհետևելու պարագայում տրիգերը կարող է հայտնվել մետակայուն վիճակում կամ կարող է փոխանցել սխալ ազդանշան:

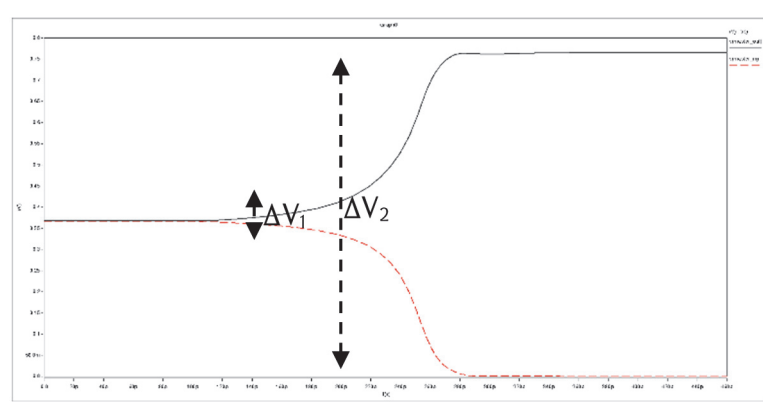
Տվյալ գրանցելու ժամանակ տվյալների D ազդանշանին պետք է որոշակի ժամանակ, որպեսզի այն հասցնի հաստատվել՝ մինչև սինքրոազդանշանի ակտիվ ճակատը: Այդ ժամանակը կոչվում է տեղակայման ժամանակ [4]:

Այն չափելու համար անհրաժեշտ է տվյալների ազդանշանը այնքան մոտեցնել սինքրոազդանշանի ակտիվ ճակատին, մինչև ելքային ազդանշանի հապաղման արժեքը մեծանա նոմինալ արժեքից սահմանված չափով:

Տեղակայման ժամանակը ապահովելուց հետո հարց է առաջանում, թե որքան ժամանակ է անհրաժեշտ պահել D ազդանշանը հաստատուն սինքրոազդանշանի ակտիվ ճակատից հետո՝ տվյալի անխափան գրանցումն ապահովելու նպատակով: Այդ ժամանակային սահմանափակումը կոչվում է պահպանման ժամանակ [4] և սահմանվում է որպես նվազագույն ժամանակ սինքրոազդանշանի ակտիվ ճակատից մինչև D ազդանշանի փոփոխությունը:

**Ժամանակային հաստատունի չափումը** D-տրիգերի մետակայուն վիճակից դուրս գալու կարևորագույն պարամետրերից է ժամանակային հաստատունը ( $\tau$ ):  $\tau$ -ն սարքի ֆիզիկական պարամետրերից կախված ժամանակային հաստատուն է, որը ցույց է տալիս, թե ինչ արագությամբ է սարքը դուրս գալիս մետակայուն վիճակից:  $\tau$ -ն որոշվում է բանաձև (1)-ով՝ նկ.3-ում բերված մոդելավորման արդյունքներով [5]:

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{\Delta V_2}{\Delta V_1}\right)} : \quad (1)$$



Նկ. 3.  $\tau$ -ի հաշվարկի մոդելավորումը

**ԽՄԸԺ-ի հաշվարկը.** Գոյություն ունեն մի շարք մեթոդներ, որոնք հաշվում են սխեմայում խափանումների ի հայտ գալու հավանականությունը [6]: Այդ հավանականությունը նշանակենք  $P_F$ -ով, այն կարտահայտվի հետևյալ բանաձևով [2]՝

$$P_F = f_c T_0 e^{-t_s/\tau}, \quad (2)$$

որտեղ  $f_c$ -ն ընդունող սինքրոազդանշանի հաճախությունն է:  $T_0$ -ն՝ այն ժամանակային պատուհանը, որտեղ տվյալի հայտնվելու դեպքում սարքը կհայտնվի մետակայուն վիճակում (տեղակայման և պահպանման ժամանակների գումարն է) և կոչվում է մետակայունության պատուհան:

$$T_0 = T_{SU} + T_{HO} : \quad (3)$$

$t_s$ -ը ազդանշանի տրամաբանական մակարդակում հաստատվելու թույլատրելի ժամանակն է և որոշվում է (3) բանաձևով՝

$$t_s = T_{CLK} - T_{C2Q} - T_{SU} : \quad (4)$$

Խափանումների հաճախությունը նշանակվում է  $\lambda$  տառով և որոշվում է հետևյալ բանաձևով, որտեղ  $f_d$ -ն տվյալի հաճախությունն է՝

$$\lambda = f_c P_F = f_d f_c T_0 e^{-t_s/\tau} : \quad (5)$$

$\lambda$ -ի հակառակ մեծությունը կոչվում է ԽՄԸԺ և հաշվվում է բանաձև (5)-ով՝

$$MTBF = \frac{e^{t_s/\tau}}{f_d f_c T_0} : \quad (6)$$

**Սինքրոնացնող սխեմաներում մետակայուն վիճակի պարամետրերի չափումների և ԽՄԸԺ-ի հաշվարկի ավտոմատացված համակարգը.** Հաշվի առնելով, որ նշված բոլոր չափումներն ու հաշվարկները նախագծողից պահանջում են լրացուցիչ ռեսուրսների ծախս, աշխատանքի շրջանակներում մշակվել է այդ ամենը կատարող ավտոմատացված համակարգ, որը նախագծողից պահանջում է ներմուծել միայն մուտքային տվյալները: Նկ.4-ում բերված է առաջարկվող ավտոմատացված համակարգի քայլերի հաջորդականությունը:

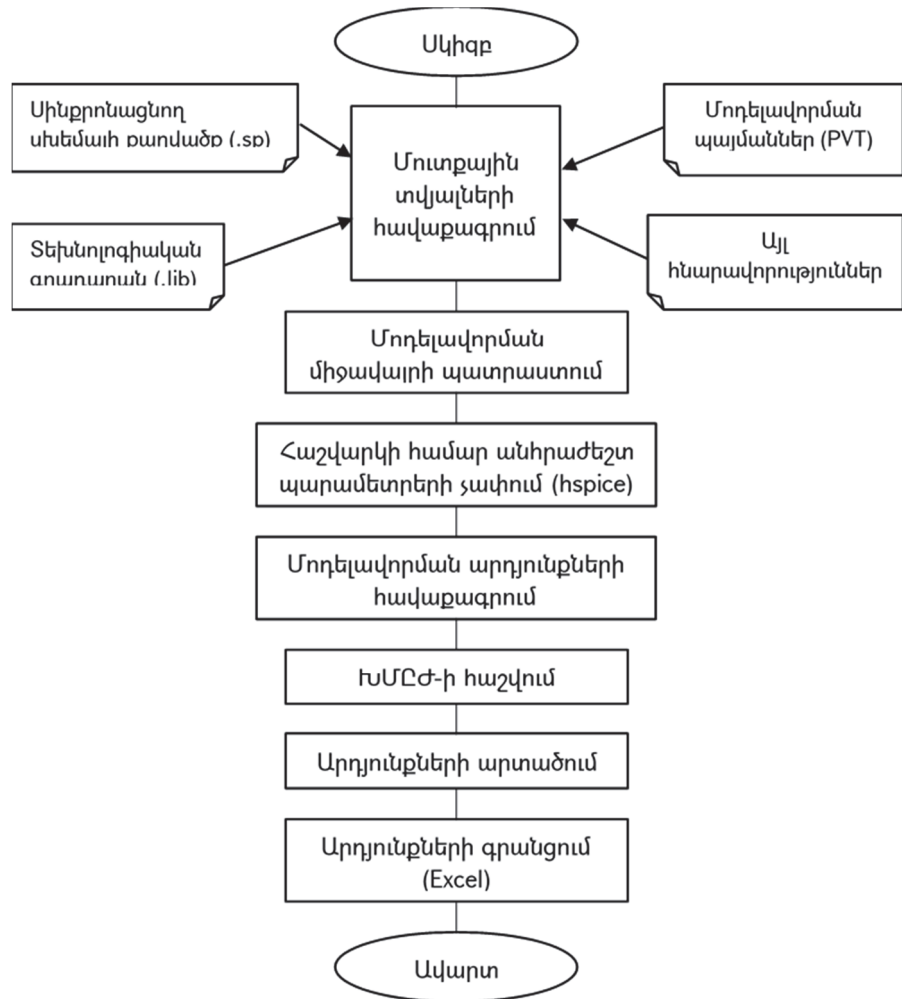
Մուտքային տվյալների հավաքագրումից հետո տեղի է ունենում մոդելավորման միջավայրի պատրաստումը, որը ներկայացնում է SPICE նկարագրերի ստեղծումը պարամետրերի չափումները կատարելու համար: Մշակվել են ավտոմատ չափման միջոցներ hspice մոդելավորման լեզվի միջոցով: Առաջարկվող համակարգը չափում է սինքրոնացնող սխեմայի տեղակայման և պահպանման ժամանակները, ժամանակային հաստատունի արժեքը՝ ընտրված ՊԼՋ դեպքերի համար:

Չափումները կատարելուց հետո համակարգը հաշվում է ԽՄԸԺ-ի հաշվարկի համար անհրաժեշտ պարամետրերի արժեքները՝ (3) և (4) բանաձևերի հիման վրա, որից հետո կատարում է ԽՄԸԺ-ի հաշվարկ (6) բանաձևի հիման վրա:

Քանի որ տեխնիկական առաջադրանքում նշվում է ԽՄԸԺ-ի նվազագույն արժեքը և նախագծված սխեման պետք է բավարարի այդ պայմանները, ուստի առաջարկվող համակարգը հնարավորություն է տալիս հաշվելու սինքրոնացնող սխեմաների նվազագույն քանակ, որի դեպքում տեխնիկական առաջադրանքը կբավարարվի: ԽՄԸԺ-ը բազմահանգուցային սինքրոնացնող սխեմաների համար ունի հետևյալ տեսքը [7]՝

$$MTBF = \frac{e^{(N-1)t_S/\tau}}{f_d f_c T_0}, \quad (7)$$

որտեղ N-ը հանգույցների քանակն է:

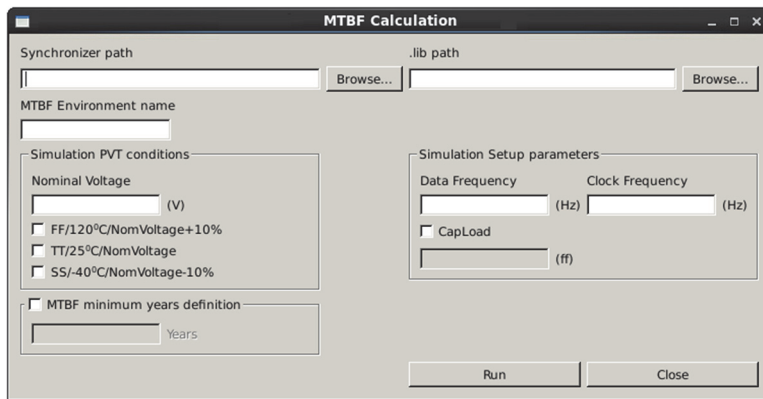


Նկ. 4. Առաջարկվող համակարգի բլոկ-սխեման

Բանաձև (7)-ից կարելի է որոշել սինքրոնացնող սխեմաների անհրաժեշտ քանակը՝

$$N = \frac{T}{t_s} \ln(F_C \cdot F_D \cdot T_0 \cdot MTBF) + 1: \quad (8)$$

Ավտոմատացված համակարգի համար մշակվել է գրաֆիկական միջավայր, որը նախագծողին թույլ է տալիս հեշտությամբ կատարել չափումներն ու հաշվարկները (նկ. 5):

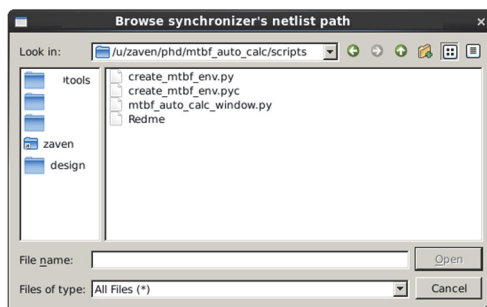


Նկ. 5. Ավտոմատացված համակարգի գրաֆիկական պատուհանը

- “Browse...” կոճակը հնարավորություն է տալիս ընտրելու սինքրոնացնող սխեմայի քաղվածքը և տեխնոլոգիական գրադարանը (նկ.6):

- “MTBF Environment name” դաշտում լրացվում է մոդելավորման միջավայրի անվանումը:

- “Simulation PVT conditions” դաշտում տրվում է սնման լարման արժեքը, և ընտրվում են մոդելավորման պայմանները (ՊԼՋ դեպքեր)՝ տրանզիստորի տիպը, ջերմաստիճանը, սնուցման լարումը (չափումներն ու հաշվարկները կարելի է կատարել բոլոր պայմանների համար միանգամից):



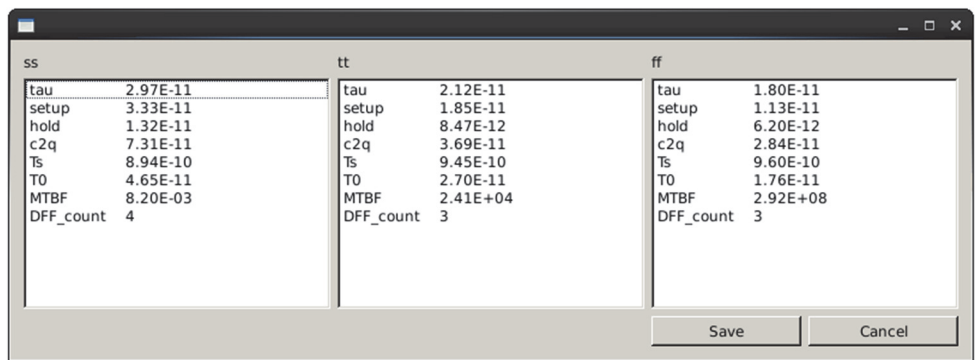
Նկ. 6. Որոնման պատուհանը

- “MTBF minimum years definition” դաշտը կարելի է ակտիվացնել և սահմանել ԽՄԸԺ-ի նվազագույն տարիների արժեքը:

- “Simulation Setup parameters” դաշտում տրվում են երկու սինքրոնադաշնանային տիրույթների հաճախությունները: Համակարգը թույլ է տալիս նաև անհրաժեշտության դեպքում ելքային ունակային բեռի չափը սահմանել:

- “Run” կոճակի միջոցով գործի է դրվում համակարգը:

Չափումների և հաշվարկների ավարտից հետո համակարգը արտաձում է բոլոր տվյալները (նկ.7):



Նկ. 7. Արդյունքների արտաձման պատուհանը

“Save” կոճակը սեղմելու դեպքում արդյունքները պահպանվում են Excel ֆայլում, որի տեսքը բերված է նկ.8-ում: Յուրաքանչյուր ՊԼՋ դեպքի համար արդյունքները գրանցվում են առանձին էջում:

	A	B	C	D
1				
2		Fd	1.00E+09	
3		Fc	1.00E+09	
4		setup	1.14E-11	
5		hold	6.20E-12	
6		c2q	2.84E-11	
7		tau	1.80E-11	
8		ts	9.60E-10	
9		t0	1.76E-11	
10				
11		MTBF	9.20E+15 sec	
12			2.56E+12 hour	
13			2.92E+8 year	
14				
15				

Նկ. 8. Excel ֆայլի տեսքը

**Արդյունքների համեմատությունը.** Ավտոմատացված համակարգի մշակումից հետո կատարվել են աշխատանքային ժամանակի չափումներ՝ կախված ՊԼՋ դեպքերից.

- լավագույն դեպք – 18 վրկ.
- լավագույն և տիպային դեպքեր – 20 վրկ.
- լավագույն, տիպային և վատագույն դեպքեր – 25 վրկ.

Ավտոմատացված համակարգի ստացված արդյունքները համեմատվել են դասական եղանակով չափված արդյունքների հետ: Արդյունքները բերված են աղյուսակում:

Աղյուսակ

Առաջարկվող մոդեցմամբ չափված արդյունքների համեմատությունը դասական եղանակի հետ

Հաշվարկի տեսակ	Տեղակայման ժամանակ (սվ)	Պահպանման ժամանակ (սվ)	Մուտք-ելք հապաղում (սվ)	τ (սվ)	ԽՄԸԺ (տարի)
Ոչ ավտոմատացված համակարգ	17.5	9.3	36.9	20.9	4.67*10 <sup>4</sup>
Առաջարկվող ավտոմատացված համակարգ	18.6	8.4	36.9	21.2	2.41*10 <sup>4</sup>

**Եզրակացություն.** Հետազոտվել են սինքրոնացնող սխեմաներում մետակայուն վիճակի պարամետրերի չափումների և ԽՄԸԺ-ի հաշվման եղանակները: Մշակվել է ավտոմատացված համակարգ այդ չափումները կատարելու համար: Համակարգը թույլ է տալիս հաշվել ԽՄԸԺ-ի արժեքը և անհրաժեշտության դեպքում հաշվել և առաջարկել սինքրոնացնող սխեմաների անհրաժեշտ քանակությունը՝ ցանկալի ԽՄԸԺ-ի արժեք ստանալու համար:

#### ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **Ginosar R.** Metastability and synchronizers: A tutorial //IEEE Design & Test of Computers. – 2011. – №. 5. – P. 23-35.
2. **Golson, Steve.** "Synchronization and Metastability." Synopsys Users Group (SNUG) Silicon Valley 2014.
3. **Строгонов А.** Схемотехника КМОП триггеров заказных БИС //Компоненты и Технологии. – 2007. – №. 69. – С. 196-200.
4. **Baker R. J.** CMOS: Circuit Design, Layout, and Simulation. -2010.
5. **Zhou J.** Design and measurement of synchronizers: Thesis. – University of Newcastle upon Tyne, 2008.

6. Variability in multistage synchronizers / **S. Beer, J. Cox, R. Ginosar, et al** //IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2015. – №. 12. – P. 2957-2969.
7. **Beer S., Ginosar R.** Eleven ways to boost your synchronizer //IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2015. – P. 1040-1049.

**З.М. АВЕТИСЯН**

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
МЕТАСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ И РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ  
НАРАБОТКИ НА ОТКАЗ В СИНХРОНИЗАТОРАХ**

Параллельно с развитием современных технологий часто используются многосинхросигнальные узлы в системах на кристалле. Они помогают совмещать друг с другом работу ряда схем, однако это вызывает проблемы, одной из которых является приведение в соответствие сигналов, образующихся в разных синхросигнальных областях. Для решения этой проблемы применяются синхронизаторы, в которых существует вероятность попадания в метастабильное состояние, что может привести к нарушению работы схемы.

В статье исследованы методы измерения параметров метастабильного состояния и расчета величины наработки на отказ в синхронизаторах. Предложена автоматизированная система, которая поможет инженеру с легкостью производить расчеты и измерения вышеуказанных параметров в течение проверки работы сверхбольшой интегральной схемы.

**Ключевые слова:** многосинхросигнальная система на кристалле, метастабильность, постоянная времени, автоматизированная система.

**Z.M. AVETISYAN**

**AN AUTOMATED SYSTEM FOR MEASURING THE METASTABILITY  
PARAMETERS AND CALCULATING THE MEAN TIME BETWEEN THE  
FAILURES IN SYNCHRONIZERS**

Parallel to the development of modern technologies, the multi-clock domains in System on Chip are often used. They help to combine the work of different blocks in SoC. To synchronize the signals coming from other clock domains, synchronizers are used, which have a probability to enter the metastability, which may bring to a failure of the system.

Within the scope of this paper, methods for measuring the metastability parameters and calculating the mean time between the failures are investigated. The automated system is proposed which helps the designer to measure and calculate the mentioned parameters easily during the design verification of VLSI.

**Keyword:** multi-clock SoC, metastability, timing constant, automated system.