



## DINAMINIS SAULĖS ELEMENTO TYRIMAS

Vytautas MAKARSKAS<sup>1</sup>, Mindaugas JUREVIČIUS<sup>2</sup>, Artūras KILIKEVIČIUS<sup>3</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

*E-paštas: <sup>1</sup>v.makarskas@gmail.com; <sup>2</sup>mindaugas.jurevicius@vgtu.lt; <sup>3</sup>arturas.kilikevicius@vgtu.lt*

**Santrauka.** Saulės elementai – vieni populiariausių atsinaujinančių energijos gavybos technologijų, nes jie patikimi, jų mažos eksploataavimo ir priežiūros išlaidos, šie elementai sudaryti be jokių judančių dalių ir yra beribis energijos šaltinis. Bet saulės elementas neišvengia mechaninių virpesių, kurie gali įskelti saulės elemento stiklą, pažeisti vidinę konstrukciją. Siekiant nustatyti mechaninių virpesių įtaką saulės elemento konstrukcijai, buvo atliktos teorinės ir eksperimentinės modalinės analizės. Tyrime buvo rasti pavojingi saulės elemento dažniai ir jų deformacijos, rastas optimalus tvirtinimo būdas, kuris suteikia geresnį saulės elemento stabilumą.

**Reikšminiai žodžiai:** saulės elementas, tvirtinimai, virpesiai, dinaminės charakteristikos.

### Įvadas

Kiekvieną dieną sparčiai didėjant gyventojų populiacijai, augant visuomenės poreikiams ir vartojimo mastui, besivystančiai žmonijai vis daugiau reikia pagaminti elektros energijos (Bilgen *et al.* 2008). Šiandien didžiausias energijos kiekis suvartojamas iš pagaminto iškastinio kuro, kuris yra neatsinaujantis ir mažėja diena iš dienos (Kaltschmitt *et al.* 2007). Šiuolaikinio pasaulio rūpestis – užtikrinti tvarų ir natūralų egzistavimą, paliekant neužterštą aplinką ateinančioms kartoms. Kaip žinoma, iškastinio kuro naudojimas sukelia aplinkos taršą, šiltnamio efektą, išmetamas didelis anglies dioksido kiekis (Fay, Golomb 2002). Todėl labai aktualu sumažinti iškastinio kuro gavybą ir apriboti jo naudojimo mastą. Dėl šių priežasčių labai svarbu naudoti kitus – alternatyvius – energijos šaltinius (Vanek *et al.* 2012). Idealus energijos šaltinis dabartinei visuomenei turėtų būti atsinaujantis ir darytų minimalų neigiamą poveikį aplinkai (Howard 2002). Atsinaujinantys energijos šaltiniai yra būtini siekiant užtikrinti tvarią energijos gamybą ateityje. Atsinaujinantys energijos šaltiniai yra tokie: vandens, vėjo, fotoelektros (saulės), biomasės, geoterminiai.

Tarp įvairių atsinaujinančių energijos šaltinių saulės energija yra viena perspektyviausių ateities energijos gavybos priemonių. Fotoelektros (saulės) energija gaunama iš Saulės spindulių ir iš jos naudingai konvertuoja į šilumą ir elektros energiją per įvairias saulės energijos technologijas, tarp kurių yra saulės elementas (Narasimhan *et al.* 2016).

Fotovoltainės sistemos (saulės elementai) – vieni iš populiariausių atsinaujinančių energijos gavybos technologijų, nes jie patikimi, mažos jų eksploataavimo ir priežiūros išlaidos, sudaryti be jokių judančių dalių ir yra beribis energijos šaltinis (Yildiran, Tacer 2016). Saulės elementas lengvai pritaikomas įvairiose srityse: kosmonautikoje, pastatų statyboje, laivų, automobilių gamyboje, geležinkeluose, buityje, kompiuterinėse technologijose ir kt. Bet saulės elementas neišvengia mechaninių virpesių (pvz., prie pastato pritvirtintą saulės elementą veikia aplinkos virpesiai). Mechaniniai virpesiai gali įskelti saulės elemento stiklą, pažeisti vidinę konstrukciją.

Siekiant nustatyti mechaninių virpesių įtaką saulės elemento konstrukcijai, buvo atlikti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai. Juos atliekant buvo rasti saulės elemento modaliniai parametrai, nustatyti rezonansiniai dažniai ir jų deformacijos, rastas optimalus tvirtinimo būdas, kuris suteikia geresnį saulės elemento stabilumą.

Saulės elementui labai svarbus stabilumas, nes saulės elemento konstrukcija sudaryta iš įvairių smulkių, trapių detalių (vamzdeliai, stiklas, kristalai). Saulės elementas statomas atviroje aplinkoje (ant pastato stogo, laukuose), kurioje jis yra veikiamas aplinkos virpesių (pvz., žmogaus ir mašinos atliekamo darbo, vėjo).

Pagrindinis straipsnyje nagrinėjamų tyrimų tikslas – atlikti saulės elementų ir jų tvirtinimo sistemų dinamikos tyrimus, kurie parodo saulės elemento konstrukcijos dinamines savybes, labai svarbias eksploatauojant.

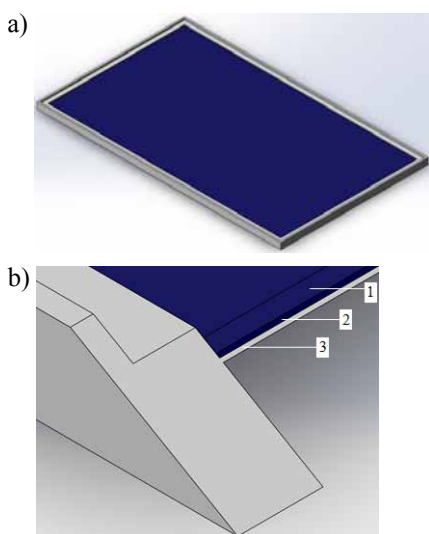
## Darbo eiga

Eksperimentinėje modalinėje analizėje virpesių parametrams matuoti buvo panaudotos „Brüel & Kjør“ matavimo priemonės: du trijų ašių akcelerometrai 4506; kilnojamoji matavimo rezultatų apdorojimo įranga „3660-D“ su kompiuteriu DELL. Akcelerometrai 4506 buvo tvirtinami ant atitinkamų saulės elemento taškų. Atliekant modalinę analizę vienas akcelerometras 4506 buvo stacionariai įtvirtintas (t. y. buvo nekeičiama jo pozicija visų matavimų metu), kitas buvo kilnojamas ir turėjo skirtingą poziciją. Buvo atlikti 76 matavimai (nes saulės elementas eksperimentinės modalinės analizės metu buvo padalytas į 60 baigtinių elementų, kaip matyti iš 2 lentelės). Gauti matavimo signalai kompiuteriu buvo apdorojami, naudojant programinį paketą „Pulse“.

Teorinė modalinė analizė buvo atlikta su „SolidWorks“ programiniu paketu. Programoje buvo suprojektuotas supaprastintas saulės elemento modelis. Jį sudaro stiklas, silikono kristalai ir plastikinis pagrindas, sujungtas su korpusu (1 pav.).

Trijų medžiagų savybės, naudojamos teorinėje modalinėje analizėje pateiktos 1 lentelėje.

Naudojant programinio paketo „SolidWorks“ įrankį „Simulation“ buvo nustatyti reikiami įtvirtinimai ir saulės elemento modelis padalytas į baigtinius elementus (2 pav.). Įvykdžius visas išvardytas sąlygas, buvo gauti 6 pavojingi dažniai (modos).



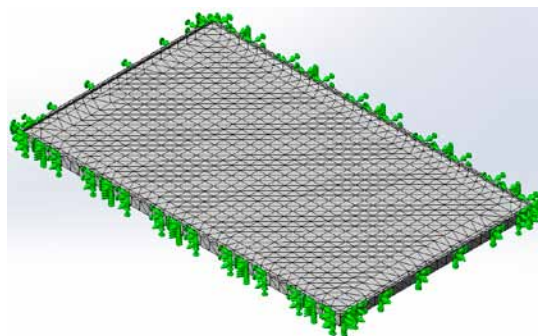
1 pav. Saulės elemento modelis „SolidWorks“ aplinkoje (a), saulės elemento modelio pjūvis (b):  
1 – stiklas; 2 – silikono kristalai; 3 – pagrindas

Fig. 1. Solar cell model in SolidWorks environment (a), b show the solar cell model section: 1 – glass; 2 – silicon crystals; 3 – base

1 lentelė. Saulės elemento medžiagų savybės

Table 1. The material properties of solar cell

Medžiaga	Stiklas	Silikono kristalas	Plastikas (PVC)
Tempimo riba	–	–	1,3e+7 N/m <sup>2</sup>
Tankis	2457,6 kg/m <sup>3</sup>	2330 kg/m <sup>3</sup>	1290 kg/m <sup>3</sup>
Jungo modulis	6,8935e + 10 N/m <sup>2</sup>	1,5e + 11 N/m <sup>2</sup>	6e + 6 N/m <sup>2</sup>
Puasono koeficientas	0,23	0,17	0,47



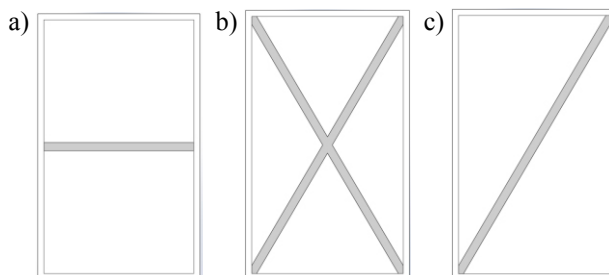
2 pav. Saulės elemento modelis, padalytas į baigtinius elementus su nustatytais įtvirtinimais

Fig. 2. Solar cell model divided into finite elements with fixed fortifications

Saulės elemento deformacijos nuo jos konstrukcijos pateiktos 2 lentelėje, kurioje teorinio eksperimento programos „SolidWorks“ deformacijos lyginamos su eksperimentinio tyrimo programos „Pulse“ deformacijomis.

Apžvelgus 2 lentelę galima pastebėti, kad mažiausias nesutapimas yra trečioje modoje (1,86 %), o didžiausias – antroje (16,95 %).

Siekiant rasti geresnį teorinį būdą, kuris galėtų sumažinti saulės elemento dažnius, buvo panaudotas programinis paketas „SolidWorks“. Programoje sukurti trys strypai su įvairiomis formomis (3 pav.) buvo įtvirtinti ant saulės elemento apačios.

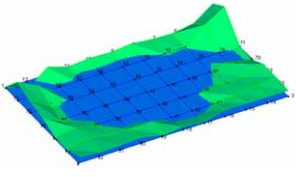
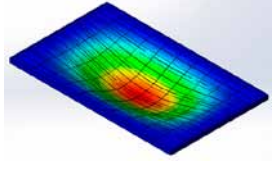
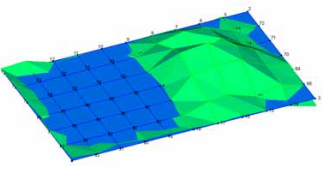
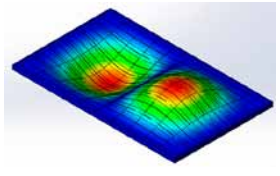
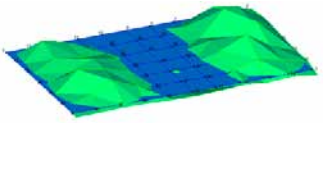
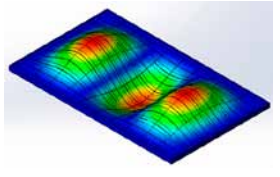
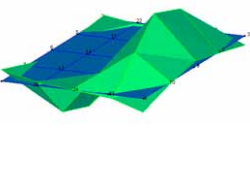
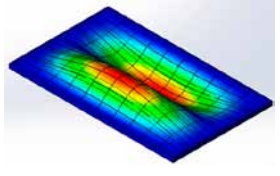
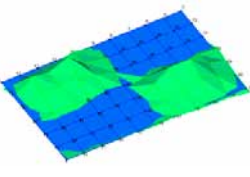
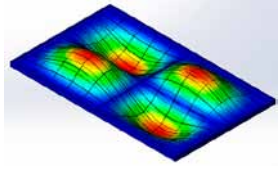
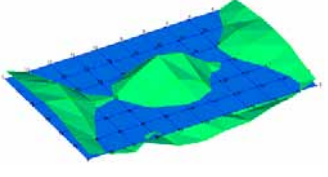
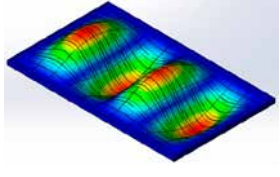


3 pav. Trys strypai „SolidWorks“ aplinkoje: a – horizontalus strypas; b – X formos strypas; c – įstrižas strypas

Fig. 3. Three bars in SolidWorks environment: a – horizontal bar; b – X form bar; c – diagonal bar

2 lentelė. Saulės elemento konstrukcijos deformacijos

Table 2. Solar panel deflection

Modos Nr.	Eksperimentiniai rezultatai		Teoriniai rezultatai		Neatitikimas, %
	dažniai, Hz	„Pulse“ formos	dažniai, Hz	„SolidWorks“ formos	
1	16		16,3		1,87
2	20		23,39		16,95
3	35		35,65		1,86
4	38,25		41,33		8,05
5	46		48,4		5,22
6	61		52,91		13,26

3 lentelė. Saulės elemento konstrukcijos deformacijos su horizontaliais įtvirtinimais

Table 3. Solar cell deflection with horizontal fortification

Modos Nr.	Saulės elemento be įtvirtinimo dažniai, Hz	Saulės elemento su horizontaliu įtvirtinimu dažniai, Hz	Saulės elemento su X formos įtvirtinimu dažniai, Hz	Saulės elemento su įstrižiniu įtvirtinimu dažniai, Hz
1	16,3	22,53	19,02	17,72
2	23,39	26,1	32,07	28,37
3	35,65	37,29	49,85	42,68
4	41,33	50,04	51,68	45,85
5	48,4	51,16	57,23	55,06
6	52,91	57,34	72,18	60,85

4 lentelė. Strypų medžiagos savybės  
Table 4. The material properties of bars

Medžiaga	AISI 1045
Tempimo riba	6,25e + 8 N/m <sup>2</sup>
Tankis	7850 kg/m <sup>3</sup>
Jungo modulis	2,05e + 11 N/m <sup>2</sup>
Puasono koeficientas	0,29

Strypų medžiaga – plienas 45 (AISI 1045), jo savybės pateiktos 4 lentelėje.

Norint surasti geriausią tvirtinimo būdą, buvo atliktas nagrinėjamos sistemos modeliavimas „SolidWorks“ aplinkoje. Gauti rezultatai palyginti tarpusavyje ir su eksperimentinio tyrimo rezultatais be jokio papildomo tvirtinimo (3 lentelėje). Apžvelgus 3 lentelę galima pastebėti, kad mažiausią skirtumą tarp saulės elemento be įtvirtinimo ir saulės elemento su horizontaliu įtvirtinimu rodo trečia moda (4,6 %), o didžiausią – pirma moda (38,22 %). Mažiausias skirtumas tarp saulės elemento be įtvirtinimo ir saulės elemento su X formos įtvirtinimu rodo pirma moda (16,69 %), o didžiausią – trečia moda (39,83 %). Mažiausią skirtumą tarp saulės elemento be įtvirtinimo ir saulės elemento su įstrižiniu įtvirtinimu pateikia pirma moda (8,71 %), o didžiausią – antra moda (21,29 %).

## Išvados

Iš gautų saulės elementų modeliavimo rezultatų ir „SolidWorks“ aplinkoje atlikto modeliavimo galima nustatyti, kad geriausias siūlomas saulės elementų papildomas tvirtinimo būdas yra tada, kai naudojamas horizontalus strypas. Horizontalus įtvirtinimas yra geresnis, palyginti su kitais, tuo, kad efektyviau slopina pirmą modą, o ji pati pavojingesnė tiek savo dažniu, tiek savo sukeliama deformacija.

## Literatūra

- Bilgen, S.; Keles, S.; Kaygusuz, A.; Sari, A.; Kaygusuz, K. 2008. Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12: 372–396. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.016>
- Fay, J. A.; Golomb, D. S. 2002. *Energy and the environment*. Oxford: Oxford University Press. 384 p.
- Howard, G. 2002. *Energy revolution: policies for sustainable future*. Washington: Island Pres. 256 p.
- Yildiran, N.; Tacer, E. 2016. Identification of photovoltaic cell single diode discrete model parameters based on datasheet values, *Solar Energy* 127: 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.024>
- Kaltschmitt, M.; Streicher, W.; Wiese, A. 2007. *Renewable energy: technology, economics and environment*. Berlin: Springer-Verlag. 564 p.
- Narasimhan, V.; Jiang, D.; Park, S. Y. 2016. Design and optical analyses of an arrayed microfluidic tunable prism panel for enhancing solar energy collection, *Applied Energy* 162: 450–459. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.051>
- Vanek, F. M.; Albright, L. D.; Angenent, L. T. 2012. *Energy systems engineering: evaluation and implementation*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill. 672 p.

## DYNAMIC RESEARCH OF SOLAR CELLS

V. Makarskas, M. Jurevičius, A. Kilikevičius

### Abstract

Solar cells are one of the most popular renewable energy generation technologies, because they are reliable, low operating and maintenance costs, to conclude without any moving parts and is a boundless source of energy. In any solar cell can avoid mechanical vibrations, which may produce the solar cell glass, damage to the inner structure. In order to determine the influence of mechanical vibrations of the solar cell structure was carried out theoretical and experimental modal analysis. The study found dangerous solar cell frequencies and their deformation and optimize the method of attachment which provides a better solar cell stability.

**Keywords:** solar cell, fortifications, vibrations, dynamic characteristics.