

UDC 629.067

DOI 10.52171/2076-0515_2024_16_03_7_17

Study of the Features of Non-Traditional Current Sensors and the Possibilities of their Use in Aircraft

I.A. Isgandarov, V.S. Huseynov

Azerbaijan National Academy of Aviation (Mardakan ave. 30, Baku, AZ1045, Azerbaijan)

For correspondence: e-mail: iisgandarov@naa.edu.az

Abstract

The article analyzes the performance characteristics of non-traditional current sensors and the possibilities of their use in aircrafts. The possibilities of using electro-optical voltage sensors based on the Kerr and Pockels effect, magneto-optical current sensors based on the Faraday effect and thermoelectric current sensors in the power supply system of aircraft are considered, and a comparative analysis of the advantages and disadvantages of the non-traditional Rogowski current sensor is carried out. It is shown that magneto-optical current sensors based on the Faraday effect are characterized by large values of measured currents and a wide frequency range. Schemes for constructing traditional current sensors used in aircraft power supply systems are considered, and issues of reliability of protection circuits are analyzed. Options for the development and implementation of non-traditional sensors that make it possible to improve the operational and technical characteristics of various components of the aircraft power supply system are considered in detail. It has been established that the future use of created optoelectronic sensors based on the magneto-optical Faraday effects, electro-optical Pockels and Kerr effects, as well as sensors based on the Rogowski winding for measuring very high currents and voltages in both ground-based and on-board electrical networks can be considered more expedient from a design and technological point of view.

Keywords: current sensor, Rogowski coil, electric-optical effect, magnet-optical effect, Pockels effect, Kerr effect, magnetostriction.

Accepted 09.04.2024

Received 19.09.2024

Revised 23.09.2024

For citation:

I.A. Isgandarov, V.S. Huseynov

[Study of the Features of Non-Traditional Current Sensors and the Possibilities of their Use in Aircraft]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2024, vol. 16, № 3, pp. 7-17 (in Azerbaijani)

Qeyri-ənənəvi cərəyan vericilərinin işçi xüsusiyyətlərinin və uçuş aparatlarında tətbiqi imkanlarının tədqiqi

İ.Ə. İsgəndərov, V.S. Hüseynov

Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Mərdəkan pr. 30, Bakı, AZ1045, Azərbaycan)

Xülasə

Məqalədə qeyri-ənənəvi cərəyan vericilərinin işçi xüsusiyyətlərinin və uçuş aparatlarında tətbiqi imkanlarının təhlili aparılmışdır. Qeyri-ənənəvi vericilər kimi elektrooptik Kerr və Pokkels effektinə əsaslanan gərginlik vericilərinin, maqnitooptik Faradey effektinə əsaslanan və termoelektrik cərəyan vericilərinin uçuş aparatlarının elektrik təchizat sistemində tətbiqi imkanları baxılmış və qeyri-ənənəvi Roqovski cərəyan vericisinin üstün və çatışmayan cəhətlərinin müqayisəli təhlilləri nəzərdən keçirilmişdir. Nəzərdən keçirilən Faradey effektinə əsaslanan maqnitooptik cərəyan vericilərinin ölçülən cərəyanların qiymətlərinin böyük və tezlik diapazonunun geniş olması ilə səciyyələnməsi göstərilmişdir. Uçuş aparatlarının elektrik təchizatı sistemlərində istifadə olunan ənənəvi cərəyan vericilərinin qurulma dövrləri baxılmış və mühafizə sxemlərinin etibarlıq məsələləri analiz edilmişdir. Uçuş aparatlarının elektrik qida sisteminin müxtəlif qovşaqlarının istismar-texniki xarakteristikalarını yaxşılaşdırmağa imkan verən qeyri-ənənəvi vericilərin işlənilib tətbiq olunması variantları ətraflı baxılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, maqnitooptik Faradey, elektrooptik Pokkels və Kerr effektlərinə əsaslanmış optoelektron vericilərinin və eyni zamanda, Roqovski sarğacı əsasında vericilərin yaradılıb, istər yerüstü, istərsə də bort elektrik şəbəkələrində çox böyük cərəyanların və gərginliklərin ölçülməsi üçün gələcəkdə tətbiq olunması konstruktiv-texnoloji baxımdan daha məqsədə uyğun hesab oluna bilər.

Açar sözlər: cərəyan vericisi, Roqovski sarğacı, elektrooptik effekt, maqnitooptik effekt, Faradey effekti, Kerr effekti, maqnitostriksiya.

Исследование особенностей нетрадиционных датчиков тока и возможностей их применения в летательных аппаратах

И.А. Искендеров, В.С. Гусейнов

Азербайджанский Национальная академия авиации (Мардаканский пр.30, Баку, AZ1045, Азербайджан)

Аннотация

В статье проведен анализ рабочих характеристик нетрадиционных датчиков тока и возможностей их применения в летательных аппаратах. Рассмотрены возможности применения в качестве нетрадиционных датчиков, электрооптических датчиков напряжения на основе эффекта Керра и Погкельса, магнитооптических датчиков тока на основе эффекта Фарадея и термоэлектрических датчиков тока в системе электроснабжения летательных аппаратов. Проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков нетрадиционного датчика тока Роговского. Показано, что магнитооптические датчики тока, основанные на эффекте Фарадея, характеризуются большими значениями измеряемых токов и широким частотным диапазоном. Рассмотрены схемы построения традиционных датчиков тока, применяемых в системах электроснабжения летательных аппаратов, проанализированы вопросы надежности схем защиты. Рассмотрены варианты разработки и внедрения нетрадиционных датчиков, позволяющих улучшить эксплуатационно-технические характеристики различных узлов системы электропитания летательных аппаратов. Установлено, что применение в перспективе оптоэлектронных датчиков на основе магнитооптических эффектов Фарадея, электрооптических эффектов Погкельса и Керра, а также датчиков на основе обмотки Роговского для измерения очень больших токов и напряжений как в наземных, так и в бортовых электрических сетях можно считать более целесообразным с конструктивно-технологической точки зрения.

Ключевые слова: передатчик тока, обмотка Роговски, электрооптический эффект, магнитооптический эффект, эффект Фарадея, эффект Керра, магнитострикция.

Giriş

Dövrümüzdə yüksək gərginlik və cərəyanları ölçmək üçün müxtəlif fiziki qanunlara əsaslanan qurğu və vasitələr geniş tətbiq edilməkdədir [1, 2]. Bu tip vasitələrə iş prinsipi Om qanununa əsaslanan rezistiv, induktiv və tutum vericilərini, elektromaqnit induksiya hadisəsinə əsaslanan ölçü transformatorları və Holl effektiv cərəyan vericilərini misal göstərmək olar. Qeyd etdiyimiz ənənəvi cərəyan vericilərinin istismarı zamanı onun texniki-istismar göstəricilərində bir çox çatışmazlıqların yaranması qaçılmaz olur [3, 4].

Bu səbəbdən, son illər elektrooptik və lifli-optik gərginlik, maqnitooptik üsullara əsaslanan cərəyan vericilərinin yaradılmasına böyük maraq göstərilir. Ənənəvi olmayan vericilərin tətbiqindəki çətinliklərə baxmayaraq, son illərdə elektrooptik və maqnitooptik effektlərə əsaslanan qeyri-ənənəvi yüksək gərginlik və cərəyan vericiləri çox geniş şəkildə istifadə edilməkdədir [5, 6].

Qeyri-ənənəvi vericilər kimi modernləşdirilmiş Xoll vericilərinin, elektrooptik Kerr və Pokkels effektinə əsaslanan gərginlik vericilərinin, maqnitooptik Faradey və termoelektrik effektlərə əsaslanan cərəyan vericilərinin uçuş aparatlarının elektrik təchizat sistemində tətbiqi və qeyri-ənənəvi Roqovski cərəyan vericisinin işlənməsi üzrə tədqiqatlar aktual olmaqla yanaşı həmçinin müasirdir.

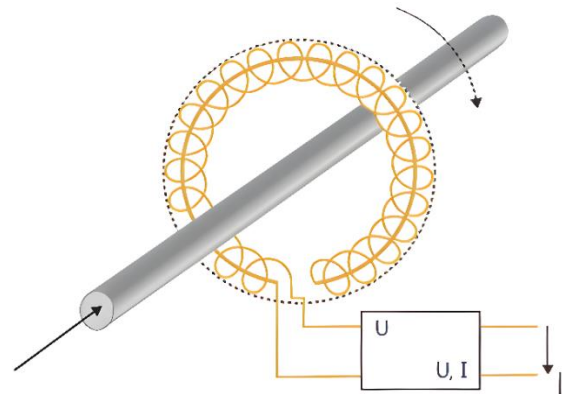
Məsələnin qoyuluşu

Uçuş aparatlarının uçuşunun idarə olunması zamanı bort sistemlərinin göstəricilərinin düzgünlüyü elektrik təchizatı sisteminin parametrlərinin stabil olmasından birbaşa asılıdır. Təhlükəsizlik baxımından, elektrik kəmiyyətlərin sıçrayışlı dəyişmələri və elektrik dövrlərindəki cərəyanın normadan artıq qiymətləri zamanı yarana biləcək nasazlıqların qarşısını

almaq üçün etibarlı mühafizə sisteminin yaradılması ən vacib məsələlərdən biridir. Bu mənada ənənəvi cərəyan vericilərinin çatışmazlıqlarını nəzərə alaraq onların yeni tətbiq tapmış qeyri-ənənəvi cərəyan vericiləri ilə əvəz olunması məsələlərinin müqayisəli analizini aparıb, əhəmiyyətli nəticələri təhlil etmək tədqiqat prosesinin vacib tərkib hissələrindən biridir.

Məsələnin həlli

Araşdırmalar və uçuş aparatlarının (UA) bort elektrik təchizatı sisteminin fərqli xüsusiyyətlərinin tədqiqi göstərir ki, UA-larda tətbiq nöqtəyi-nəzərindən, Roqovski sarğacı daha müasir və perspektivli cərəyan vericisidir. Hava nüvəsi olan və sarğaların düzgün bir şəkildə sarıldığı, həmçinin xarici elektromaqnit təsirlərdən qorunmaq üçün ekranlanmış toroid dolağıdır. Ənənəvi induktivlik sarğaclarından və transformatorlarından fərqli olaraq, Roqovski sarğacının dolağının ucları bir nöqtəyə gətirilir və yük ilə qapadılır (şək.1).



Şəkil 1 – Roqovski sarğacının konstruktiv görünüşü

Figure 1 – Structural view of the Rogowsky coil

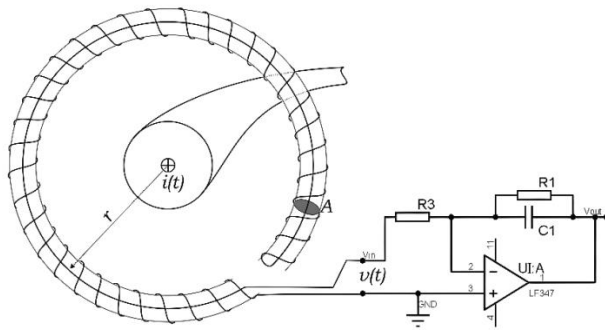
Konstruksiya olunmasına görə Roqovski sarğacı bir dəfə dolanan birinci tərəf dolağının olması səbəbi ilə, cərəyan transformatorundan fərqlənir. Sarğacda ölçülən cərəyanın axdığı naqilin ətrafında yaranan maqnit sahəsinin

təsiri ilə e.h.q. yaranır. Amper qanununa görə, maqnit sahə gücünün, hər hansı qapalı kontur üzərindəki xətti integralı, bu kontur tərəfindən məhdudlanan səthdəki ümumi cərəyana bərabərdir. Maqnit seli Φ və maqnit sahə qüvvəsi H arasındakı rabitə aşağıdakı ifadə ilə təyin edilir:

$$\Phi = \iint \mu_0 \cdot H dS = \mu_0 \cdot A \cdot n \oint H \cdot dl \quad (1)$$
 burada H maqnit sahə qüvvəsi, $dS = A \cdot n \cdot dl$ (A əsas hissənin en kəsik sahəsi, n isə dl uzunluğundakı hissədə sarğınların sayıdır).

Qapalı bir konturda, cərəyan şiddətinin əmələ gətirdiyi maqnit sahəsi meydana çıxdığında induksiyaalanan elektrik sahəsi:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 \cdot A \cdot n \frac{dl}{dt} = -M \frac{dl}{dt} \quad (2)$$
 burada $M = \mu_0 \cdot A \cdot n$ dolaq və naqıl arasındakı qarşılıqlı induktivlikdir.



Şəkil 2 – Roqovski sarğının qoşulma sxemi
Figure 2 – Connection diagram of the Rogowski coil

Roqovski sarğının çıxışında əldə etdiyimiz gərginlik, cərəyan şiddətinin törəməsi ilə əlaqəli olduğundan, dI/dt ilə mütənasib siqnalı daha sonrakı proseslərdə $I(t)$ ilə əlaqəli bir siqnala çevirmək üçün integrator lazımdır [2, 6, 7-12]. Şəkil 2-də, Roqovski sarğının, əməliyyat gücləndiricisi əsasında qurulmuş integratora qoşulması sxemi göstərilmişdir.

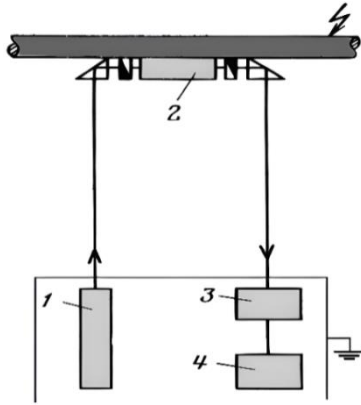
Aparılan ilkin hesablamalar və ölçmələr, çıxışı 100 amperlərə hesablanmış 3-fazlı

400 Hs-lik təyyarə bort elektrik generatorunun işçi cərəyanlarına nəzarət üçün hazırlanan Roqovski sarğının çıxışında alınan siqnalın amplitudunun həm cərəyandan asılılığının, həm də tezlikdən asılılığının xətti olduğunu təsdiq edir. Laboratoriya şəraitində, eksperiment üçün ağ izolyator karkasda sarınmış Roqovski sarğısından keçən naqilindən, 400kHs tezlikli 100mA cərəyan buraxdıqda sarğın uclarında alınan siqnalın amplitudu təxminən $U_m=25mV$ olur. Bu isə onu deməyə əsas verir ki, hava gəmilərinin bortunda 400Hs tezlikli cərəyan dövrlərində işçi cərəyan 100A hədlərində, yəni eksperimentdə götürdüyümüz qiymətlərdən 1000 dəfə çox olduqda, işçi tezlik isə eksperimentdə olduğundan 1000 dəfə az olduğundan (400Hs) həmin hala uyğun olaraq, 30 mV qiymətlərini almış olarıq (cədvəl). Sarğının dolağının sarğınlarının sayını artırmaqla siqnalın səviyyəsini daha da artırmaq olar. Cərəyanın istər amplitud, istərsə də orta qiymətinin ölçülməsi zamanı, həmçinin yüklənmə və qısa qapanmalara görə elektron mühafizə sxemlərini qurarkən, vericinin uclarındakı siqnalın və ölçülən cərəyanın fazalarının eyni olub olmaması bir əhəmiyyət kəsb etmir.

Cədvəl – Müxtəlif cərəyan qiymətlərində Roqovski vericisinin siqnal səviyyələri

Table – Signal levels of the Rogowski coil (sensor) at different current values

№	Dəyişən cərəyan, mA (f=400kHs)	Roqovski vericisinin siqnal səviyyəsi, mV ($R_v = 100 \text{ Om}$)
1	10	4
2	20	7
3	50	16
4	70	22
5	90	28
6	100	30



Şəkil 3 – Optoelektron ölçü transformatorunun konstruktiv sxemi:

1 – polarizasiya olunmuş işıq mənbəyi; 2 – elektrooptik çevirici; 3 – işıq analizatoru; 4 – çıxış parametrləri fotoçevirici və gücləndirici.

Figure 3 – Structural scheme of the optoelectronic instrument transformer:

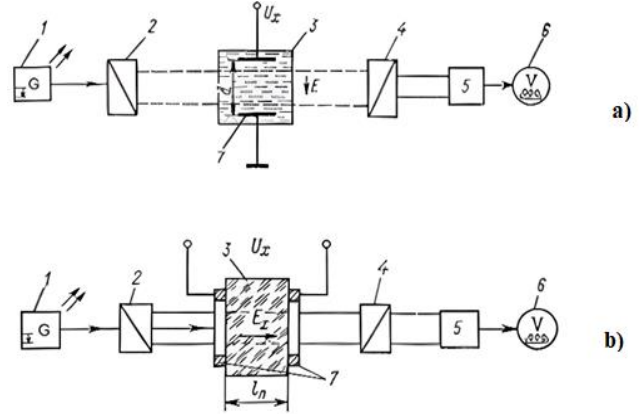
1 – polarized light source; 2 – electro-optical transducer; 3 – light analyzer; 4 – photoconverter and amplifier with output parameters.

Bu o deməkdir ki, integrator istifadə etmədən bu parametrlərə birbaşa nəzarəti aparmaq olar, lazım gəldikdə isə əlavə gücləndirici istifadə etmək olar.

Cərəyanların kiçik qiymətlərində, maneə və küylər ilə əlaqəli olan əlavə xətlər yaranır. Bu xətlər, uyğun konstruktiv həllər hesabına minimuma endirilə bilər.

Bununla yanaşı, həmçinin uzun illərdir ki, dünyanın bir çox yerində Kerr elektrooptik effekti, Pokkels (gərginlik ölçülməsi üçün) effekti və Faradeyin maqnitooptik effektinə (cərəyan şiddətinin ölçülməsi üçün) əsaslanan optoelektron tiptə gərginlik transformatorları və cərəyan transformatorları (şək. 3) tətbiq edilir və inkişaf etdirilir.

Kerr və Pokkels əsaslı gərginlik transformatorlarında, işıq dəstəsi, ölçülən gərginliyin tətbiq olunduğu elektrodlar arasında olan aktiv materialdakı elektrik sahəsi tərəfindən modulyasiya edilir (şək. 4).



Şəkil 4 – Kerr (a) və Pokkels (b) elektrooptik çeviriciləri

1 – işıq mənbəyi; 2 – işıq polarizatoru; 3 – aktiv material; 4 – Polarizasiya analizatoru; 5 – fotoqəbuledici; 6 – çıxış elementi; 7 – ölçülən gərginliyin tətbiq olunduğu elektrodlar.

Figure 4 – Kerr (a) and Pokkels (b) electro-optical transducers

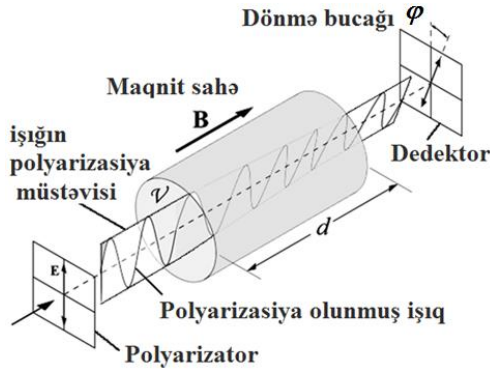
1 – light source; 2 – light polarizer; 3 – active material; 4 – Polarization analyzer; 5 – photoreceptor; 6 – output element; 7 – electrodes to which the measured voltage is applied.

Kerr effekti bir çox izotrop maddədə (benzol, epoksid compound və s.) görülür, lakin ən böyük təsirə malik olan nitrobenzol ən çox istifadə edilən maddədir.

Xətti elektrooptik Pokkels effekti elektrik sahəsinə yerləşdirilən pyezoelektrik kristallarda müşahidə edilir. Bu effekt ən çox halqa şəkilli elektrodlar tərəfindən yaradılan, uzununa elektrik sahəsində $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ və KH_2PO_4 kristallarında daha da nəzərə çarpan hal alır.

Optoelektronik cərəyan transformatorlarında Faradey effekti istifadə edilir (şək. 5) və mahiyyət etibarilə aktiv bir materialda polarizasiya edilmiş işığın polarizasiya müstəvisinin xarici maqnit sahəsinin təsiri altında dönməsidir. Işığın polarizasiya müstəvisinin dönmə bucağını ölçərək, maqnit sahəsi parametrləri haqqında məlumata sahib ola bilərik. Ölçülən cərəyanın yaratdığı maqnit sahəsinə yerləşdirilən bu tip vericilər maqnit sahə in-

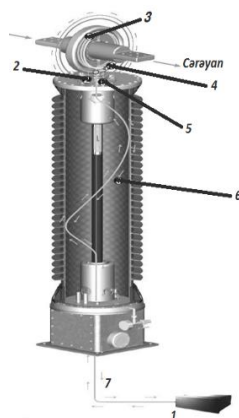
duksiyasını və yaxud cərəyan şiddətini müəyyən etməyimizə imkan yaradacaqdır.



Şəkil 5 – Faradey effektinə əsaslanmış maqnit-optik çevirici

Figure 5 – Magneto-optical transducer based on the Faraday effect

Bu tip cihazlar 30-40 ildir ki təkmilləşdirilir və sadəcə son illərdə optik transformatorlar adı altında satışa çıxarılmışdır (şək. 6). Cərəyan transformatoru hissetmə elementi, elastik lifin aşağı endirilməsini təmin edən, izolyasiya olunmuş polimer sütunvari hissəyə bərkidilmişdir. 1 giriş signal çeviricisidir və metrərlə işıq polarizasiyasını qoruyan lifli optik xətt ilə ötürülən, iki xətti polarizasiya edilmiş işıq signalı generasiya edir.



Şəkil 6 – NxtPhase (ABŞ) tərəfindən hazırlanan maqnitooptik transformator

Figure 6 – Magneto-optical transformer manufactured by NxtPhase (USA).

İşıqın polarizasiya müstəvisinin dönmə bucağı bu ifadə ilə təyin edilir :

$$\varphi = R \cdot L \cdot B \quad (3)$$

Burada B – maqnit seli induksiyası (Tesla), L – Faradey effektinin müşahidə olunduğu materialın maqnit seli ilə əlaqədə olan hissəsinin uzunluğu, R əmsalı Verde sabitidir.

Verde sabitinin qiyməti maddənin təbiətindən, fiziki şəraitdən və dalğa uzunluğundan asılıdır. Verde sabitinin dalğa uzunluğundan asılılığı aşağıdakı kimidir:

$$R = A/\lambda^2 + C/\lambda^4 \quad (4)$$

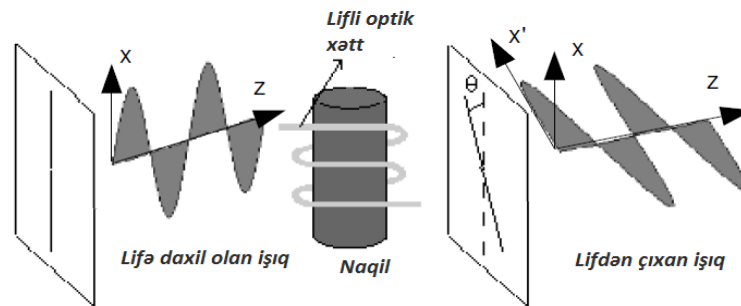
Burada A və B sabit kəmiyyətlərdir. Maddənin təbiətindən asılı olaraq polarlaşma müstəvisi saat əqrəbi istiqamətində, yaxud da əksinə dönə bilər və buna uyğun olaraq müsbət və mənfi Faradey effektləri fərqləndirilir.

İzolyasiya sütunvari borunun üstündəki dairəvi polarizator (2), xətti polarizasiya edilmiş iki işıq signalını, sol və sağ olmaqla iki dairəvi polarizasiya edilmiş işıq signalına çevirir. Işıq signalı (3) keçirici naqilin ətrafında nəzarəti təmin edir. Yüksək gərginlikli naqildən axan cərəyan tərəfindən meydana gətirilən maqnit sahəsi, bu iki işıq signallarından birini yavaşladacaq, digərini isə sürətləndirəcəkdir. Dairəvi polarizasiya edilmiş işıq signalı naqil ətrafından fırlandıqdan sonra güzgü (4) vasitəsi ilə əks etdirilir və geri göndərilir. Işıq signalının bu geri gəlmə zamanında signal arasında fərq daha da güclənir. Bundan sonra, hər iki signal yenidən xətti polarizasiya olunmuş işıq signalına çevrilmək üçün dairəvi polarizatora (2) geri qaydır. Işıq lifli optik xətt (6) vasitəsi ilə sütunun altındakı optoelektron qurğuya qaydır. Bu iki optik signalın yayılma sürəti arasında fərq aralarında faza sürüşməsinə səbəb olur. Hər iki signalda eyni yol boyunca yayıldığı üçün, vibrasiya və istilik dəyişiklikləri bu iki signala bərabər təsir göstərəcək və bu səbəblə

mövcüd ölçmədəki xətlərin olması ehtimalını aradan qaldıracaqdır. Faradey effektinə əsaslanmış maqnitooptik cərəyan vericiləri, güclü maqnit sahələrin və bu sahələri yaradan cərəyanların təmamsız ölçülməsi üçün istifadə edilir (şək. 7). Lifli optik verici tərtibatlarının aşağı çəkili və kiçik qabarit ölçülərinin olması, təyyarə, helikopter və kosmik gəmi kimi sahələrdə gələcək tətbiqinin vacibliyini artırmaqdadır.

Elektromaqnit sahə içinə yerləşdirilən və maqnitooptik xassəsi göstərən bir materialda xətti polarizasiya edilmiş işığın polarizasiya müstəvisi, işığın yayılma istiqamətinə paralel

olaraq yönləndirilmiş maqnit sahəsinin təsiri ilə bucağını dəyişərək döndür. Lazerin kəşfi ilə birlikdə bu effektdən elektrik cərəyanı ölçmək üçün istifadə edilməkdədir. Çox az itkili lifli optik xətlərin və xüsusi ilə tək modlu lifli optik xətlərin istehsalı ilə, lifli optik cərəyan vericilərinin hazırlanma xərcləri azaldılmışdır. Lifli optik xətlərinin istifadəsinin ən böyük xüsusiyyəti, elektrik baxımından izolasiya edici material olmasıdır. Lifli optik cərəyan vericilərinin üstünlükləri arasında doymanın və histerezis itkilərin olmaması səbəbi ilə, dəqiq cavab vermə qabiliyyəti və yüksək tezliklərdə istifadə bacarığının olmasıdır [7-14].



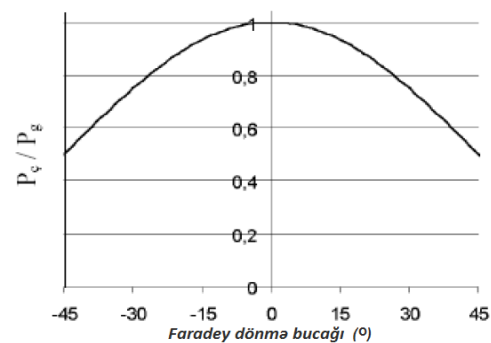
Şəkil 7 – Faradey effektinə əsaslanmış cərəyan vericisinin konstruktiv sxemi
Figure 7 – Structural scheme of the current transmitter based on the Faraday effect

Çox modlu lifli optik xətlər işığın polarizasiyasını pozduğu üçün, bu tip vericilərdə adətən tək modlu lifli optik xətlərdən istifadə edirlər. Bükülən tipdə olan lifli optik xətlərdə xətti cüt qırılma müşahidə olunur və bu vericinin həssaslığını azaldır və verici çıxışının istiliyə görə dəyişməsinə artırır. Bükülmə səbəbi ilə yaranan mənfi təsirlərin azaldılması üçün, lifli optik xətlərin hazırlanmasına böyük diqqət yetirirlər.

İşığın giriş gücü sabit və itkilər nəzərə alınmadıqda, giriş gücü ilə çıxış gücü arasındakı əlaqə:

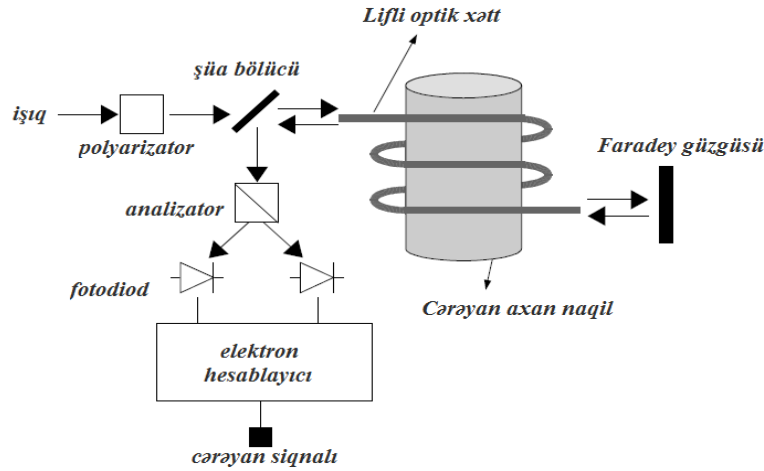
$$P_{\phi} = P_g \cos^2 \varphi \quad (5)$$

Belə olduğu halda Faradey dönməsi ilə çıxış gücü arasındakı əlaqə şək.8.-də göstərilən qrafikdəki kimi olmalıdır.



Şəkil 8 – Faradey dönmə bucağının, işığın giriş və çıxış gücündən asılılığı

Figure 8 – Dependence of the Faraday rotation angle on the input and output power of light



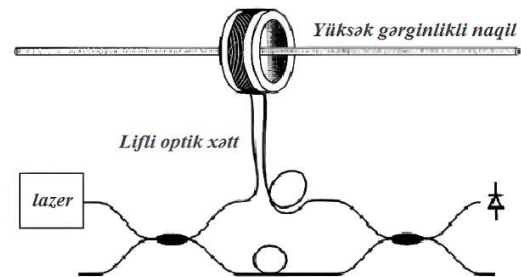
Şəkil 9 – Faradey güzgüsü istifadə olunmuş lifli-optik cərəyan vericisinin prinsipial sxemi
Figure 9 – Schematic diagram of a fiber-optic current transmitter using a Faraday mirror

Şəkil 9-da Faradey güzgüsünə sahib lifli optik cərəyan vericisinin prinsipial sxemi göstərilmişdir.

Bu polarizasiya edilmiş işıq, cərəyan axan naqılın ətrafına lifli optik xəttə daxil olur və Faradey güzgüsü ilə işıq əks olunaraq yəni-dən lifli optik xəttə daxil olur və müstəvi bucağını dəyişir. Optik xətdən çıxan işıq, şüa bölücü sayəsində analizatora daxil olur və x,y mürəkkəbələrinə ayrılır. Elektron qurğu bu mürəkkəbələri cərəyanı çevirən fotodiodlar vasitəsilə naqıldən axan cərəyanı hesablayır. Bu metodda, işıq iki dəfə Faradey dönməsinə məruz qaldığı üçün çıxış signalı daha da qüvvətlənmiş və dəqiqləşmiş olur (şək.9).

Nəzərdən keçirdiyimiz Faradey effektinə əsaslanan maqnitooptik cərəyan vericiləri, ölçülən cərəyanların qiymətlərinin böyük və tezlik diapazonunun geniş olması ilə səciyyələnir. Həmçinin, çox kiçik ölçü xətlərinə malik olan bu vericilər həssaslığı ilə də seçilir. Misal olaraq NxtPhase firması tərəfindən istehsal edilmiş Faradey effektinə əsaslanmış maqnitooptik cərəyan vericisi, sadəcə 0.15-0.3% həssaslıqla 1-3000 A qiymətində olan cərəyanları və 10-6 kHs tezlik diapazonunda

ölçmə aparmaq qabiliyyətinə malikdir. Laboratoriya şəraitində xəta payı 0.03% təşkil edir. Prinsip cəhətdən bənzər və təxminən eyni parametrlərə sahib olan vericilər ABB firması tərəfindən FOCT və KVH adı altında istehsal edirlər. Şəkil 10-da maqnitostriksiya əsaslı lifli optik vericinin konstruktiv sxemi təsvir olunmuşdur [4].



Şəkil 10 – Maqnitostriksiya əsaslı lifli optik vericinin konstruktiv sxemi

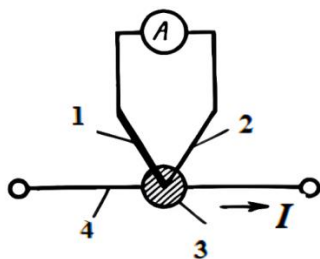
Figure 10 – Structural scheme of magnetostriction-based fiber optic sensor

Maqnitooptik vericilərin əsas üstünlükləri bunlardır: həssas elementin elektrik xəttindən ideal izolyasiyası; xüsusi liflər istifadə etməklə istilik dayanıqlığının təmin edilməsi; ölçülən cərəyanların və cərəyan tezliklərinin

geniş diapazonda olması; yüksək ölçmə həssaslığı. Maqnitostriksiya prinsipi 1980-ci ilə təklif olunmuşdur və maqnitostriktiv material mexaniki olaraq optik lifli xəttə qoşulur. Bu tip vericilərin mahiyyəti, bu material bir maqnit sahə təsirinə məruz qaldıqda lifli optik xətdə gərilmə müşahidə olunur. Bu gərilmə nəticəsində lifli optik xəttin uzunluğu dəyişikliyə uğrayır. Lifli optik xəttin uzunluğundakı bu dəyişiklik, xəttin bir ucuna bağlanan Max-Zehnder interferometr cihazı ilə təyin edilir.

İsbatlanmışdır ki, ən yaxşı metod lifli optik xəttin maqnitostriktiv material ilə üzlənməsidir. Buna baxmayaraq, digər istilik təsirləri nəticəsində optik xətlərin deformasiya olunması, bu tip vericilərin əsas çatışmazlığı olaraq hesab edilir [1-4].

Termoelektrik cərəyan ölçənlər də ənənəvi olmayan cərəyan vericiləridir və iş prinsipi iki fərqli metal arasındakı təmasların xüsusiyyətlərinə əsaslanır. Bu tip vericilər əsasında termoelektrik ampermetrlər hazırlanır. Termoelektrik ampermetrin işləmə prinsipi (şək. 11), yüksək tezlikli cərəyanın keçdiyi naqıl üzərində (1 və 2) iki fərqli metal kontaktının (3) isidilməsi nəticəsində sabit cərəyan gərginliyi olaraq meydana çıxan termo e.h.q.-nin ölçülməsinə əsaslanır.



Şəkil 11 – Termoelektrik cərəyan vericisinin konstruktiv sxemi və iş prinsipi

Figure 11 – Structural scheme and operation principle of thermoelectric current transmitter

Düyun nöqtəsində müşahidə edilən termo e.h.q.-nin qiyməti istilikdən, dolayısı ilə əsas naqıldən axan cərəyanın qiymətindən asılıdır. Əgər (3) yüksək qiymətə malik cərəyan axan naqıl tərəfindən bu düyun nöqtəsinə istilik verilsə, termo e.h.q. artar və bu iki fərqli metalın uclarında potensiallar fərqlinin yaranmasına səbəb olar.

Metal uclarındakı potensial fərqlinin ölçülməsi ilə əsas naqıldən axan cərəyan haqqında məlumata sahib ola bilərik. Termoelektrik ampermetrlərin iş prinsipi bu effekt ilə səciyyələnir.

Termoelektrik ampermetrlər geniş tezlik diapazonunda (3000 MHz-ə qədər) yüksək və aşağı qiymətli cərəyanları ölçmək üçün istifadə edirlər. Bu tip cihazlar geniş şəkildə istifadə edilməkdə və müasir dövrümüzdə istifadədə olan yüksək tezlik cərəyan vericilərinin əsasını təşkil etməkdədir. Cihazların üstünlükləri yüksək həssaslığı, konstruktiv cəhətdən sadə olması, müxtəlif qiymətlərdə cərəyan ölçülməsi, etibarlı işləməsi və yüksək tezlikli cərəyanları ölçə bilməsidir. Bu vericilərin maqnitooptik vericilərə görə çatışmazlıqları isə çox yüksək cərəyanları ölçə bilməməsidir. Belə ki, böyük cərəyan qiymətlərində (100 A-dan çox) rezistiv vericilərə oxşar şəkildə, təbiqinin məhdudlaşmasına səbəb ola biləcək böyük güc itkilərinin meydana çıxması, termoelektrik vericilərin əsas çatışmazlığı kimi hesab edilir [13, 14]. Məlumdur ki, yeni nəsil hava gəmilərində elektrik təchizatı sistemlərinin etibarlılığını yüksəltmək, onların fasiləsiz və faydalı işə malik olmaları üçün yeni texnologiyalar üzrə hazırlanmış avtomatlaşdırılmış sxemlər üzrə qurulmuş qurğulardan geniş istifadə olunur. Hər bir hava gəmisində generatorun çıxış gərginliyi və cərəyanı müəyyən sxemlər üzrə qurulmuş bloklar vasitəsilə tənzimlənir. Hava gəmisinin bir çox elektrik döv-

rələrində elektromexaniki qoruyucu avtomatların tətbiqi onların ətalətliliyi və kontaktların bəzi hallarda yapışması ilə bağlı olan problemlər yaradır. Bu problemlərin aradan qaldırılması üçün çox vaxt əlavə elektrik açarı, yaxud qoruyucu element, məsələn, əriyən qoruyucu istifadə olunur. Qeyri-ənənəvi verici əsasında qurulan qoruyucu dövrə həm tələb olunan qalvanik ayırmanı təmin etməyə imkan verəcək, həm də mühafizənin cəldliyini və etibarlığını yüksəldəcək. Məsələn, qeyd edə bilərik ki, hava gəmilərinin dəyişən cərəyan generatorlarının çıxışındakı böyük işçi cərəyanlara (yüzlərlə amper) nəzarət etmək üçün bir qayda olaraq cərəyan transformatorundan istifadə olunur.

Hal-hazırda cərəyan transformatorları ən effektiv cərəyan vericiləridir, lakin bu vericilərin quraşdırılması, sökülüb dəyişdirilməsi, təmiri və köklənməsi çətin yerinə yetirilən məsələlərdir. Eyni zamanda son illər müəyyən tip hava gəmilərinin elektrik parametrlərinə nəzarət üçün xətti Xoll cərəyan vericilərinin də tətbiqinə xüsusi yer verilir. Lakin bu vericilər xarici parazit təsirlərə həssas olduğundan, vericinin həm həssaslığını, həm də maneəyə davamlılığını artırmaq üçün maqnit seli konsentratoru rolunu oynayan kəsikli toroidal maqnit içliyi istifadə edilir və Xoll vericisi kəsik sahəyə yerləşdirilir, bu isə vericinin konstruksiyasını xeyli mürəkkəbləşdirir. Qeyd olunanlar nəzərə alınmaqla elektrik qida sisteminin müxtəlif qovşaqlarının istismar-texniki xarakteristikalarını yaxşılaşdırmağa imkan verən qeyri-ənənəvi vericilərin işlənilib tətbiq olunması variantları ətraflı baxılmışdır. Müəyyən olunmuşdur ki, maqnitooptik Faradey effektinə, elektrooptik Pokels və Kerr effektlərinə əsaslanmış optoelektron vericilərinin yaradılıb tətbiq olunması

konstruktiv-texnoloji baxımdan daha məqsədə uyğun hesab oluna bilər. Belə ki, son illər yüksək gərginlikli elektrik şəbəkələrində gərginliyə və cərəyana nəzarət üçün bu effektlərə əsaslanmış optoelektron vericilər geniş tətbiq tapmaqdadır [15].

Nəticə

Tədqiqini apardığımız qeyri-ənənəvi vericilərin əsas üstün cəhətlərindən aşağıdakıları qeyd etmək daha vacib sayılır: Roqovski sarğacı üçün – geniş tezlik diapazonunda ölçmə imkanlarının olması, cərəyanın yüksək qiymətlərində istifadə oluna bilməsi, hava nüvəsinin olması səbəbi ilə doymanın olmaması, istifadənin praktik və sadə olması, tələb olunan xərclərinin çox aşağı olması; Maqnitooptik vericilər üçün – həssas elementin elektrik xəttindən ideal izolyasiyası, xüsusi liflər istifadə etməklə istilik dayanıqlığının təmin edilməsi, ölçülən cərəyanların və cərəyan tezliklərinin geniş diapazonda olması, yüksək ölçmə həssaslığı.

Aparılmış analiz və təhlillər nəticəsində həmçinin, vericilərin bəzi çatışmamazlıqlarının olduqları da müəyyən edilmişdir: Maqnitooptik vericilərin texnologiyaları çox mürəkkəb olur və daha çox xərc tələb edir. Vericinin xüsusiyyəti optik lifin keyfiyyətindən birbaşa asılı olur. Roqovski sarğacında da çatışmazlıq olaraq, başqa hər hansı bir xarici elektromaqnit sahəsinə həssas olmasını və sabit cərəyanın ölçülə bilməməsini qeyd etmək olar.

Maraqlar münaqişəsi

Müəlliflər bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edirlər.

REFERENCES

1. **Danilov A.B.** Sovremennyye promyshlennyye datchiki toka. Sovremennaya elektronika. M., 2004, №10, s.26-28. *(in Russian)*
2. **R. Dickinson, S. Milano.** Isolated Open Loop Current Sensing Using Hall Effect Techn. in Optimized Magnetic Circuit. Allegro MicroSystems, Inc.C.NH, USA, 2002, p1-12. *(in English)*
3. **Abramovich L.Yu., Lovchij I.L., Ostapenko E.I.** Optiko-elektronnyj transformator toka, osnovannyj na ispol'zovanii magnitoopticheskogo effekta Faradeya. ELEKTRO, №1, M., 2011, s.22-26. *(in Russian)*
4. **Potapov V.T., Potapov T.V., Kuhta A.V., Udalov M.E., Mamedov A.M.** Volokonno-opticheskie datchiki magnitnogo polya i elektricheskogo toka na osnove effekta Faradeya v kristallah Bi12GeO20 i Bi12SiO20. SPECVYPUSK «FOTON-EKSPRESS» - NAUKA.M., 2005, №6, s.166-176. *(in Russian)*
5. **Panahov T.M., Musayev Z.S., Isgandarov I.A.** Optical and magneto-optical properties of Ni3Fe1-xTix alloys. Fizika, V11, №4, Baku, 2001, p. 51-53. *(in English)*
6. **Pashaev A.M., Isgandarov I.A., Gusejnov V.S.** Analiz vozmozhnostej primeneniya opto-elektronnyh datchikov v sisteme zashchity elektropitaniya letatel'nyh apparatov. Tez.dok. Mezht.NTK, pos.90 let. GA Rossii.,2013g., s.67. *(in Russian)*
7. **Noskov M.M.** Opticheskie i magnitoopticheskie svoystva metallov. Sverdlovsk: UNC AN SSSR, 1983, 220s. *(in Russian)*
8. **Pashaev A.M., Tagiev B.G., Isgandarov I.A., Gusejnov V.S.** Perspektivy razrabotki i primeneniya optoelektronnyh datchikov dlya sistemy elektropitaniya letatel'nogo apparata. Mat. 11-j mezh. Konf. «AVIACIYA i KOSMONAVTIKA-2012», Tez.Dokl., Moskva, 2012, s.264-265. *(in Russian)*
9. **Paşayev A.M., İsgəndərov İ.Ə., Hüseynov V.S.** Yüksək cərəyanların ölçülməsi üçün Kerr effektinə əsaslanmış optoelektron cərəyan vericisi. Patent. U2017 0009 (a2014 0118) Dövlət reyestrində qeyd. 08.02.2023 *(in Azerbaijani)*
10. **Butushin S.V., Nikonov V.V., Semin A.V.** Analiz statistiki ekspluatatsionnyh povrezhdenij vozduzhnyh sudov grazhdanskoj aviatsii s bolshim naletom. NAUCHNYJ VESTNIK MGTU GA №179, st-19, Moskva 2012 *(in Russian)*
11. **Garanin S.A.** O tochnosti ocenivaniya parametrov radioelektronnyh sistem v slozhnyh elektromagnitnyh usloviyah. Nauchnyj vestnik MGTU GA №186, st-118, Moskva 2012 *(in Russian)*
12. Rogowski bobini akim sensörleri. Sabri ÜZEL. Ulusoy Elektrik A.S. 1. OSB Oğuz Cad. No:6 Sincan/Ankara. *(in Russian)*
13. **Kolpakov A., Kartashov E.** Rezistivnye tokovye shuntly dlya primeneniya vysokoy moshchnosti. Silovaya elektronika, - 2004 god. *(in Russian)*
14. **Abramenkova I.S., Kornev I.V., Troickij Yu.T.** Opticheskie datchiki toka i napryazheniya. Komponenty i tekhnologii, - 2006 god. *(in Russian)*
15. **Paşayev A.M., İsgəndərov İ.Ə., Hüseynov V.S.** Uçuş aparatlarının elektrik sistemlərinin xüsusiyyətləri və onların işçi parametrlərinə nəzarətin problemləri. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının XƏBƏRLƏRİ, Cild 6, №1, 2014, s. 59-66. *(in Azerbaijani)*