

# **Diagnostic Monitoring of Electric Motors Based on Artificial Intelligence Methods**

**F.H. Huseynov**

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

## **For correspondence:**

Huseynov Farid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

## **Abstract**

In this article, the possibilities of application of artificial intelligence technology in diagnostics of faults of electric motors are examined. The application of traditional diagnostic monitoring systems in the diagnosis of motors faces problems in determining the normal and threshold values of several diagnostic parameters that cannot be measured in working conditions in cases of lack of certain information. To partially overcome these problems, it is also possible to provide a new hybrid control by applying artificial intelligence-based diagnostic systems together with traditional methods to increase the efficiency and accuracy of diagnostic control in the working condition. In the research work, fault diagnosis schemes using neural networks, fuzzy logic, neural-fuzzy and genetic algorithms were studied, and their advantages and disadvantages compared to traditional diagnostic methods were analyzed. From the conducted studies, we conclude that the methods of artificial intelligence technology have a great potential in the diagnosis of difficult-to-detect faults.

**Keywords:** electric motor; artificial intelligence; fault diagnosis; neural networks; fuzzy logic; neuron-fuzzy; genetic algorithms.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_111\_121

**Received** 22.11.2022

**Revised** 19.09.2023

**Accepted** 20.09.2023

## **For citation:**

*Huseynov F.H.*

[Diagnostic Monitoring of Electric Motors Based on Artificial Intelligence Methods]

*Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 111-121 (in Azerbaijani)*

## Süni intellekt metodları əsasında elektrik mühərriklərinin diaqnostik monitorinqi

**F.H. Hüseynov**

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

### Yazışma üçün:

Hüseynov Fərid / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

### **Xülasə**

Məqalədə, süni intellekt metodlarının mühərriklərin nasazlıqlarının diaqnostikasında tətbiqi imkanları nəzərdən keçirilmişdir. Mühərriklərin diaqnostikasında ənənəvi diaqnostik monitorinq sistemlərinin tətbiqi qeyri-müəyyən informasiya çatışmazlığı hallarında, həmçinin, işçi vəziyyətdə ölçülməsi mümkün olmayan bir sıra diaqnostik parametrlərin normal və hədd qiymətlərinin müəyyən olunmasında problemlərlə üzləşir. Bu problemləri qismən aradan qaldırmaq, işçi vəziyyətdə diaqnostik nəzarətin effektivliyini və dəqiqliyini artırmaq üçün ənənəvi metodlarla yanaşı, süni intellekt əsaslı diaqnostika sistemlərinin birlikdə tətbiqi ilə yeni hibrid nəzarəti təmin etmək olar. Tədqiqat işində neyron şəbəkələri, qeyri-səlis məntiq, neyron-qeyri-səlis və genetik alqoritmlərdən istifadə edən nasazlıq diaqnostikası sxemləri tədqiq olunaraq onların ənənəvi diaqnostik metodlara nisbətən üstünlükləri və mənfi cəhətləri müqayisə edilərək təhlil olunmuşdur. Aparılmış tədqiqatlardan belə qənaətə gəlik ki, süni intellekt metodları çətin aşkarlanan nasazlıqların diaqnostikasında böyük potensiala malikdir.

**Açar sözlər:** elektrik mühərriki; süni intellekt, nasazlıqların diaqnostikası; neyron şəbəkələri; qeyri-səlis məntiq; neyron-qeyri-səlis; genetik alqoritmlər.

**DOI** 10.52171/2076-0515\_2023\_15\_03\_111\_121

УДК 321.313

## Диагностический мониторинг электродвигателей на основе методов искусственного интеллекта

**Ф.Х. Гусейнов**

*Азербайджанская Национальная академия авиации (Мардакянский пр. 30, Баку, AZ1045, Азербайджан)*

### Для переписки:

Гусейнов Фарид / e-mail: huseynovferid17525257@gmail.com

### **Аннотация**

В статье рассмотрены возможности применения технологии мягких вычислений в диагностике неисправностей электродвигателей. Применение традиционных систем диагностического мониторинга при диагностике двигателей сталкивается с проблемами определения нормальных и пороговых значений ряда диагностических параметров, которые не могут быть измерены в рабочих условиях в случаях отсутствия определенной информации. Для частичного преодоления этих проблем также можно обеспечить новый гибридный контроль путем применения систем диагностики на основе искусственного интеллекта совместно с традиционными методами с целью повышения эффективности и точности диагностического контроля в рабочем состоянии. В работе изучены схемы диагностики неисправностей с использованием нейронных сетей, нечеткой логики, нейро-нечетких и генетических алгоритмов и проанализированы их преимущества и недостатки по сравнению с традиционными методами диагностики. Исследования приводят к выводу, что методы технологии мягких вычислений имеют большой потенциал в диагностике труднообнаруживаемых неисправностей.

**Ключевые слова:** электродвигатель, мягкие вычисления, диагностика неисправностей, нейронные сети, нечеткая логика, нейрон-нечеткий, генетические алгоритмы.

## Giriş

Dəyişən və sabit cərəyan mühərrikləri nəqliyyatda və sənayenin müxtəlif sahələrində intensiv şəkildə istismar olunur. Dəyişən iş mühiti və dinamik yüklənmə həmişə mühərriklərin stator dolaqlarında sarğılararası qısaqapanmalara, yastıqların sıradan çıxmasına, rotor çubuqlarında zədələnmələrə və s. kimi böyük nasazlıqlara səbəb olur. Belə nasazlıqlar düzgün aşkar edilmədikdə və vaxtında aradan qaldırılmadıqda mühərrikin dayanması ilə nəticələnir. Nasazlıqların erkən mərhələdə diaqnostikası mühərrikin etibarlılığının artırılmasına gətirib çıxarır. Bununla birgə, nasazlıqların təyini üçün qabaqcıl aşkarlama metodlarını tətbiq etməklə texniki xidmət xərclərinə qənaət edilir. Elmi tədqiqat işlərinin təhlillərinin nəticələri göstərir ki, elektrik mühərriklərinin monitorinqi, nasazlıqların diaqnostikası və aşkarlanması elektrik mühəndisliyi sahəsində çox vacib və mürəkkəb tədqiqat sahəsidir.

Süni intellekt qeyri-müəyyənlik və qeyri-dəqiqlik şəraitində insan şüurunun yüksək səviyyədə düşünmək və öyrənmək qabiliyyətinə paralel olan intellektual hesablamanın yeni bir yanaşmasıdır. Yalnız dəqiqlik, əminlik və konkretliklə məşğul olan çətin hesablama metodlarından fərqli olaraq, real dünya problemlərinə qeyri-dəqiq və ya qeyri-adekvat, lakin iqtisadi və rəqabətli həllərin əldə edilməsində effektivdir.

Bildiyimiz kimi, praktiki operatorlardan alınan keyfiyyətli məlumatlar mühərrik nasazlığının erkən mərhələdə dəqiq və etibarlı diaqnostikasında mühüm rol oynaya bilər. Beləliklə, bu sahəyə süni intellekt metodlarının tətbiqi ənənəvi diaqnostika metodları ilə müqayisədə daha tez uyğunlaşma, rahatlıq, çeviklik və daxil edilmiş linqvistik biliklərin unikal xüsusiyyətlərini təmin edə bilər [1-3].

## Mühərrik nasazlıqlarının ənənəvi diaqnostika üsulları

Elektrik mühərriklərinin nasazlıqlarının aşkarlanması və diaqnostikası üçün çoxsaylı ənənəvi yanaşmalar mövcuddur. Ən sadə üsul birbaşa yoxlamadır. Klassik parametrlərin qiymətləndirilməsi üsulları mühərrik nasazlıqlarının aşkarlanması və diaqnostikası üçün də əsaslı şəkildə tətbiq olunur. Burada faktiki mühərrikdən gələn bəzi ölçmə siqnallarına əsaslanaraq, mühərrikin iş vəziyyəti ilə bağlı müvafiq məlumatları analiz etmək üçün parametrlərin təyini üsullarından istifadə edilir. Şəkil 1-də belə nasazlığın aşkarlanması prosesi göstərilmişdir.

Parametrlərin qiymətləndirilməsi metodu real vaxt halları üçün çox uyğundur. Lakin, qeyd edilən metod mühərrikin iş prinsipini dərinlən başa düşməyi və dəqiq riyazi modeli tələb edir.



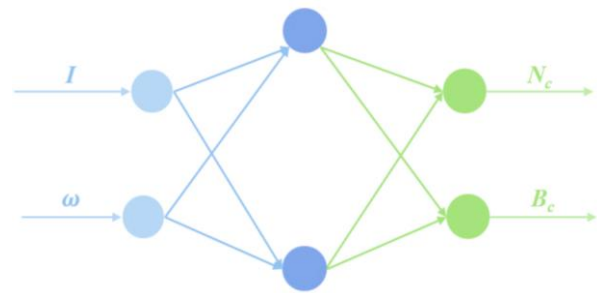
Şəkil 1 – Parametrlərin qiymətləndirilməsi əsasında mühərrik nasazlığının diaqnostikası  
Figure 1 – Diagnosis of motor failure based on parameter evaluation

Bundan əlavə, mühərrik qocaldıqca alınmış məlumatların dəqiqliyi azalır. Son bir neçə il ərzində ənənəvi diaqnostika metodlarının üzləşdiyi qeyd olunan çətinlikləri aradan qaldırmaq üçün süni intellekt metodlarından istifadə edilir. Süni intellekt texnologiyaları üç əsas hissədən ibarətdir: neyron şəbəkələr, qeyri-səlis məntiq və genetik alqoritmlər [1, 3-6]. Neyron şəbəkələrin, qeyri-səlis məntiqin, genetik alqoritmlərin və onların uyğun kombinasiyası (birləşməsi) ilə mühərriklərin nasazlığının daha dərinlən aşkarlanması və diaqnozu üçün hibrid sistemlər tətbiq edilə bilər.

### Neyron şəbəkələr əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası

Qeyri-xətti funksiyaların güclü approksimasiyası və adaptiv öyrənmə imkanlarına görə neyron şəbəkələr mühərriklərin nasazlıqlarının diaqnostikası sahəsində böyük maraq doğurur. Bəzi tədqiqatçılar neyron şəbəkələr əsasında nasazlıqların aşkarlanması üçün müxtəlif sxemlərin hərtərəfli tədqiqini aparmışlar. Onlar şəkil 2-də göstəriləyi kimi, mühərrikdə yaranan nasazlıqların diaqnostikası üçün neyron əks-yayılma şəbəkəsinin - BP (Back-propagation) tipik strukturunu təklif etmişlər. Burada yaranan nasazlıqlara, sarğıların burumları arasındakı izolyasiya və yastıqların texniki vəziyyəti aiddir [3-7].

Burada  $I$  statorun cərəyanı,  $\omega$  rotorun sürəti,  $N_c$  və  $B_c$  isə uyğun olaraq mühərrik sarğılarının izolyasiyası və yastıqların vəziyyətini xarakterizə edən kəmiyyətlərdir. Mühərrikin xarakterik tənliklərindən bilirək ki, girişlər ( $I$ ,  $\omega$ ) və çıxışlar ( $N_c$ ,  $B_c$ ) arasındakı əlaqə qeyri-xəttidir. Bu əlaqəni formalaşdırmaq üçün BP neyron şəbəkəsi tətbiq olunur. Struktur şəkil 3-də göstərilmişdir.



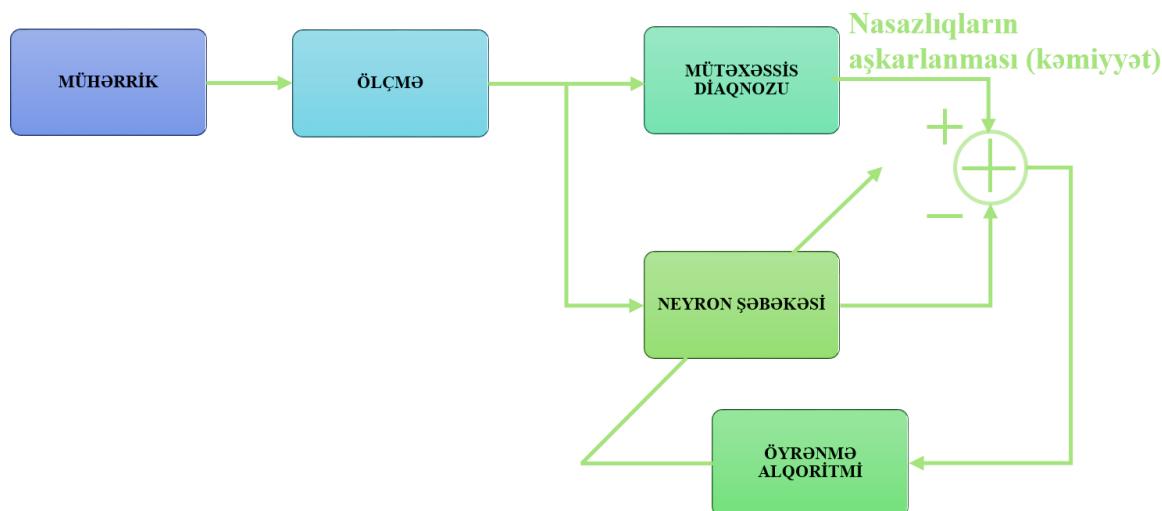
Şəkil 2 – Başlanğıc xətlərin aşkarlanması üçün BP neyron şəbəkəsi

Figure 2 – BP neural network for initial fault detection

$I$  və  $\omega$  qiymətləri onlayn ölçmə məlumatlarından asanlıqla əldə edilə bilər. Əslində, şəkil 2-dəki BP neyron şəbəkəsinin giriş parametrlərinin sayını artırmaqla (məsələn  $I_2$  və  $\omega_2$ ) dəqiqliyi artırmaq olar. Digər tərəfdən  $N_c$  və  $B_c$  şəkil 3-də göstəriləyi kimi ekspert tərəfindən qiymətləndirilməlidir. Mühərrikin vəziyyətinin monitorinqi və qüsurlarının diaqnostikası üçün mühərriki kəmiyyətə təsvir edən  $N_c$  və  $B_c$  qiymətləri üç vəziyyət səviyyəsinə (yaxşı, qənaətbəxş, pis) əsasən təsnif edilir. Neyron şəbəkə ekspertdən diaqnostika təcrübəsini öyrənmək üçün təlim keçdikdən sonra, şəkil 4-də göstəriləyi kimi, onlayn rejimdə istifadə olunur.

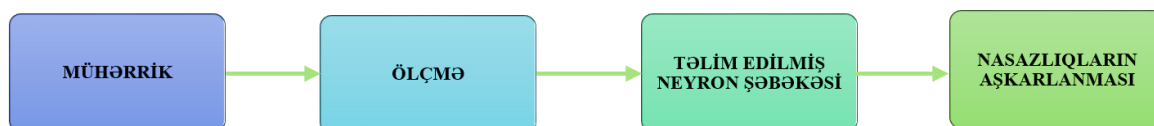
Mühərrikin vəziyyətindən, stator cərəyanından və rotorun fırlanma sürətindən asılı olaraq, neyron şəbəkə yuxarıda göstərilən üç nasazlıq səviyyəsinə uyğun olaraq başlanğıc nasazlıqları göstərə bilər.

Eyni zamanda digər tədqiqatçılar da sınıq rotor çubuqlarının sayını aşkar etmək üçün oxşar BP neyron şəbəkəsinə əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostikası sxemini təklif etmişdir. Neyron şəbəkəsi üçün təlim məlumatları saz, eləcə də simulyasiya edilmiş nasaz maşınlardan əldə edilir. Onların təklif etdiyi perspektivli sxem simulyasiyalarda 100% diaqnostika dəqiqliyinə malikdir.



**Şəkil 3** – Neyron şəbəkəyə əsaslanan mühərrik nasazlığının aşkarlanması üçün öyrənmə mərhələsi

**Figure 3** – A learning phase for neural network-based motor fault detection



**Şəkil 4** – Neyron şəbəkə əsasında mühərrik nasazlıqlarının aşkar edilməsi

**Figure 4** – Motor fault detection based on neural network

BP neyron şəbəkə ilə yanaşı mühərriklərin diaqnostikası üçün digər bir neyron şəbəkə növü olan SOM – özünü təşkildən xəritə (self-organizing map) istifadə olunur.

Məlumdur ki, stator gərginliyinin qeyrisimmetrikliliyi, dişli ötürmələrdə və rotor çubuqlarında qırılmaların yaranması, stator dolğında qısa-qapanma və s. kimi müxtəlif nasazlıqlar eyni vaxtda baş verə bilər. BP neyron şəbəkəsindən fərqli olaraq SOM əsaslı yanaşma heç bir nəzarət olmadan nasazlıqların təsnifatını öyrənmək və yaratmaq kimi praktiki üstünlüyə malikdir. Buna görə də, mühərrik nasazlıqlarının avtomatlaşdırılmış diaqnostikası sistemlərinin qurulmasında SOM-dan istifadə etmək daha faydalı ola bilər [7-11, 12].

SOM əsaslı motor nasazlığının diaqnostikası sxemini qısaca aşağıdakı kimi təsvir etmək olar. Birincisi, tipik bir SOM şəbəkəsi

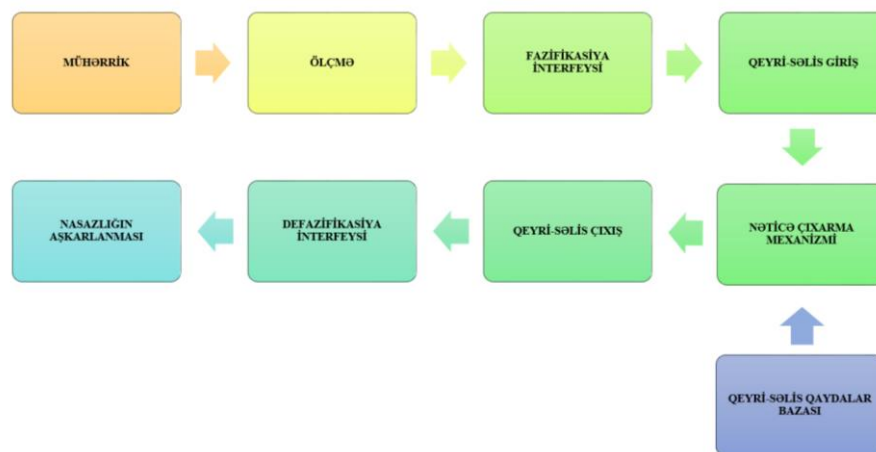
yalnız normal şəraitdə işləyən mühərriklərdən alınan məlumatlarla öyrənilir. Sonra, öyrənilmiş SOM aşkar edilməmiş ölçmə məlumatlarından istifadə etməklə sınaqdan keçirilir. Objekt xəritələşdirməsindəki xüsusiyyət qruplarına əsasən, məlumatlar mümkün nasazlıq kateqoriyasına və normal SOM məlumatlarına görə təsnif ediləcəkdir. Ekspert daha sonra real nasazlıq məlumatlarını müəyyən edə və sonradan SOM-u yenidən öyrətmək üçün bu məlumatları istifadə edə bilər. Bu yolla, ekspertin nəzarəti altında təklif olunan metod öyrənmə üçün heç bir məlumatın mövcud olmadığı nasazlıq diaqnostikası işlərini yerinə yetirə bilər. Bu metodlar yastıqlarda yaranan nasazlıqları aşkar etmək üçün fırlanan maşında tədqiq edilmişdir. Simulyasiyalar göstərmişdir ki, giriş signalının nisbətən kiçik diapazonu zamanı SOM nasazlıqları düzgün aşkarlaya bi-

lir, BP neyron şəbəkəsi isə uğursuz olur [3-5, 7,8]. Beləliklə, mühərrik nasazlığının diaqnostikası üçün neyron şəbəkələrdən istifadənin üstünlüyü onların öz-özünə uyğunlaşması və xətlərin göstəricisi ilə mövcud ölçmə signal-ları arasında əlaqə qura bilən qeyri-xətli yaxınlaşma qabiliyyətləri ilə bağlıdır. Həmçinin, öyrənmə proseduru insan ekspertləri tərəfin-dən idarə olunur. Neyron şəbəkələrə əsaslanan nasazlıq diaqnozu ümumi məqsədli həlldir. Mühərrik diaqnostikası modeli haqqında əv-vəlcədən məlumat tələb olunmur. Yalnız təlim məlumatları əvvəlcədən alınmalıdır. Bununla belə, neyron şəbəkələrə əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostikasının kritik çatışmaz-lığı ondan ibarətdir ki, mühərriklərin operato-rundan gələn keyfiyyətli və lingvistik məlumat onların ədədi yönümlü qara qutu strukturlarına

görə birbaşa istifadə edilə və ya neyron şəbə-kələrə daxil edilə bilməz.

### Mühərrik nasazlıqlarının qeyri-səlis məntiqə diaqnostikası

Nasazlıqların lingvistik dəyişənlər əsa-sında diaqnostikası biliklərindən faydalanmaq üçün qeyri-səlis məntiqdən istifadə edən çox-saylı mühərrik nasazlığının diaqnostikası üsul-ları tədqiq edilmişdir. Bir sıra tədqiqatçılar mühərrik diaqnostikasında qeyri-səlis məntiq istifadə etmişlər. Qeyri-səlis məntiqə əsasla-nan strukturun tərkib hissəsi fuzzifikasiya (qeyri-səlisləşdirmə) interfeysi, nəticə çıxarma mexanizmi, qeyri-səlis qaydalar bazası və defuzzifikasiya bloklarıdır. Qeyri-səlis diaqnos-tik nəzarət sisteminin strukturu şəkil 5-də gös-tərilmişdir.



Şəkil 5 – Qeyri-səlis məntiq əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası  
Figure 5 – Motor fault diagnosis based on fuzzy logic

Burada iki nasazlıq nəzərə alınır: stator gərginliyinin qeyri-simmetrikliliyi və açıq faza. Diaqnoz proseduru stator cərəyanlarının amplitud xüsusiyyətlərinin təhlili əsasında həyata keçirilir. Qeyri-səlis nasazlıq diaqnostikası sisteminə giriş kimi üç stator cərəyanı amplitudu  $I_a$ ,  $I_b$  və  $I_c$  seçilir. Bu girişlərə dörd qeyri-səlis üçbucaqlı və ya trapesoidal mənsubiyyət funksiyası yəni “çox kiçik”, “kiçik”, “orta” və “böyük” təyin

edilmişdir. Stator şərtləri üç düzbucaqlı mənsubiyyət funksiyası ilə ifadə olunur yəni yaxşı, zədələnmiş və ciddi şəkildə zədələnmiş. Ümumilikdə, yuxarıda qeyd olunan iki nasazlığı aşkar etmək üçün tətbiq edilən 12 evristik IF-THEN qeyri-səlis nəticə çıxarma qaydaları mövcuddur.

1. ƏGƏR  $I_c$  ortadırsa, onda stator yaxşı vəziyyətdədir;

2.  $I_b$  kiçikdirsə, ONDA stator zədələnib.

Ümumiyyətlə, belə qeyri-səlis qaydaların iki əsas mənbəyi vardır. Birinci evristik yanaşma mühərrik operatorlarından əldə edilən linqvistik təcrübəyə əsaslanır. Digər üsul saz və nasaz mühərriklərin ölçmə siqnallarından qeyri-səlis nasazlıq diaqnozu qaydalarını əldə etmək üçün bəzi özünü təşkil edən alqoritmlərdən istifadə etməkdir. Sxem kompüter simulyasiyalarında eksperimental məlumatlarla yoxlanılır ki, bu da onun nasazlıqların diaqnostikasında mühüm rol oynadığını göstərir. Nümunə üçün asinxron mühərrikdə qeyri-səlis məntiqdən istifadə edərək sınımış rotor çubuğu diaqnostika sistemini təsvir edək. Bu sistemdə təkcə nasazlığın baş verməsi deyil, həm də qırılan çubuqların sayı da aşkar edilə bilər.

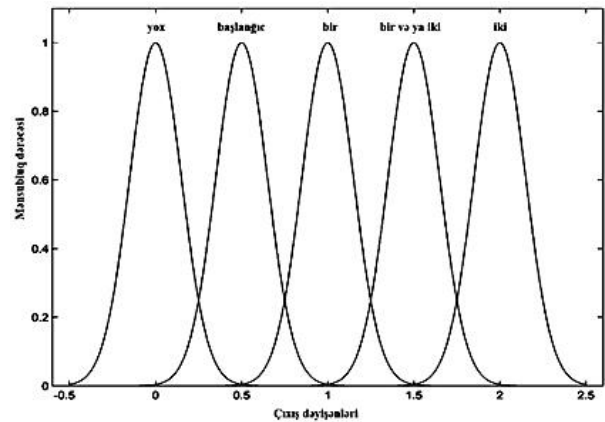
Məlumdur ki, rotor çubuqlarının qırılması nəticəsində yaranan rotor asimetriyası olan mühərrikdə harmoniklərin spektr xətləri ( $I \pm 2s$ )  $f_1$  - də mövcuddur. Burada  $s$  - sürüşmə və  $f_1$  - statorun tezliyidir. Bu iki tezlikdə harmonik komponentlərin amplitudları  $A_1$  və  $A_2$  ilə işarələnir. Sınıq çubuq nasazlığı, bu iki dəyişən əsasında aşkar edilə bilər. Əvvəlcədən müəyyən edilmiş böyük və kiçik qeyri-səlis terminlər olduqda istifadə edilən tipik qeyri-səlis qayda aşağıdakı kimidir:

- ƏGƏR  $A_1$  böyük və  $A_2$  kiçikdirsə;
- ONDA bir qırıq çubuq vardır.

Qeyd edək ki, bir qırıq çubuq kimi yaranmış nasazlıqlar neyron şəbəkəsinə əsaslanan nasazlığın diaqnostika metodlarında olduğu kimi ədədi qiymətlər əvəzinə qeyri-səlis mənsubiyyət funksiyaları ilə təsvir olunur. Onlar şəkil 6-da göstərilmişdir.

Digər nümunədə qeyri-səlis məntiqə əsaslanan mühərrikin yastıq nasazlığının diaqnostikası sxemi qeyd edilmişdir. Prinsip qeyri-səlis əsaslandırma qaydalarından istifadə

edərək aparıcı vibrasiya siqnalının tezlik spektrini təhlil etməkdir.



**Şəkil 6** – Sınıq çubuq nasazlıqları üçün mənsubiyyət funksiyaları (yox - sınıq çubuq yoxdur; başlangıç - başlangıç xəta; bir - bir sınıq çubuq; bir və ya iki - bir və ya iki sınıq çubuq; iki - iki sınıq çubuq)

**Figure 6** – Correlation functions for broken rod faults (no - no broken rod; start - starting fault; one - one broken rod; one or two - one or two broken rods; two - two broken rods)

Bildiyimiz kimi, yastıqların işçi vəziyyəti onun vibrasiya siqnallarında birbaşa əks olunur. Burada  $\{x_{loose}, x_{damage}, x_{time}\}$  həm zaman, həm də elektrik şəbəkəsində daşıyıcı xarakteristik siqnalların amplitudlarını ifadə edir. Ümumilikdə, yastıqların zədələnməsini və digər nasazlıqları aşkar etmək üçün onların sxemində səkkiz qeyri-səlis diaqnoz qaydaları tətbiq olunur. Aşağıdakı iki təmsil qaydası təsvir edilmişdir.

1. ƏGƏR  $x_{loose}$  yüksəkdirsə və  $x_{time}$  orta və ya yüksəkdirsə, ONDA yastıq nasazlığı var.

2. ƏGƏR  $x_{damage}$  yüksək və  $x_{time}$  ortadırsa, ONDA yastığın zədələnmə səviyyəsi yüksəkdir.

Bu diaqnostika yanaşması yastığın “ağır” şərtlərinin aşkar edilməsində 91,7% dəqiqliyə və yastığın “yaxşı” və “pis” vəziyyətlərində 100% dəqiqliyə nail olur [4, 10].

Qeyri-səlis məntiqə əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostika üsulları daxili

lingvistik biliklərin və təxmini düşünmə qabiliyyətinin üstünlüklərinə malikdir. Lakin, belə bir sistemin konfigurasiyası praktiki operatorlardan əldə edilən intuitiv təcrübədən əhəmiyyətli dərəcədə asılıdır.

Qeyri-səlis mənsubiyyət funksiyaların və qeyri-səlis qaydaların heç bir mənada optimal olmasına zəmanət vermək olmaz. Bundan başqa, qeyri-səlis məntiq sistemləri real vaxt rejimində nasazlıqların diaqnostikasının mürəkkəb sistemlərində öz-özünə öyrənmə qabiliyyətinə malik deyil. Yuxarıda göstərilən iki çatışmazlıq təklif edilən metod vasitəsilə neyron şəbəkələrin və qeyri-səlis məntiqin “neyron-qeyri-səlis” (hibrid) birləşməsi ilə qismən aradan qaldırıla bilər.

### **Neyron-qeyri-səlis məntiqə əsaslanan mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası**

Bildiyimiz kimi, həm neyron şəbəkələrin, həm də qeyri-səlis məntiqin özünəməxsus üstünlükləri və mənfi cəhətləri var. BP-nin neyron şəbəkəsinin əsas çatışmazlığı onun qara qutu məlumatlarının emal strukturu və konvergensiyanın aşağı sürətidir. Digər tərəfdən, qeyri-səlis məntiq insan beyninə bənzər bir nəticə çıxarma mexanizminə malikdir, lakin onun effektiv öyrənmə qabiliyyəti yoxdur. Qeyri-səlis mənsubiyyət qaydalarının və funksiyalarının avtomatik sazlanması klassik qeyri-səlis məntiq sistemində çətin ola bilər. Bir sözlə, neyron şəbəkələri modellər olmadan ədədi yanaşmalar kimi nəzərdən keçirilir və qeyri-səlis məntiq yalnız lingvistik səviyyədə qaydalar və nəticə çıxarmaqla məşğul olur. Buna görə də, neyron şəbəkələrin və qeyri-səlis məntiqin bir hibrid “neyron-qeyri-səlis” sistemdə birləşdirməklə onların hər ikisinin həm fərdi çatışmazlıqlarını aradan qaldıra,

həm də bir-birinin üstünlüklərindən daha yaxşı nəticələr əldə olunmasına nail ola bilərik. Əslində, neyron-qeyri-səlis metod əsasında mühərrikin nasazlıqlarının diaqnostikası sahəsində bir çox perspektivli nəticələr əldə etmişdir [3, 5, 6, 11].

Bəzi tədqiqatçılar tərəfindən qeyri-səlis şəbəkə sistemi (ANFIS-adaptive network-based fuzzy inference system) əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası sxemi araşdırılmışdır. Əslində, ANFIS beş səviyyəli birbaşa rabitə şəbəkəsinin arxitekturasına malik qeyri-səlis məntiqli nəticə çıxarma sisteminin tətbiqidir.

ANFIS-in strukturu və öyrənmə alqoritmi haqqında ətraflı müzakirələrə gələcək tədqiqat işlərində yer ayrılacaqdır. Burada araşdırılan diaqnostika problemi yuxarıda müzakirə edilən kimidir. Giriş və çıxış qiymətlərinin seçilməsi də oxşardır. Lakin, məsələn, ANFIS-də Mamdani tipli qeyri-səlis qaydalar yerinə Sugeno tipli doqquz qeyri-səlis qayda istifadə olunur:

- ƏGƏR  $A1$  böyük və  $A2$  kiçikdirsə;
- ONDA  $f = pA1 + qA2 + r$ .

burada  $f$  - cari qeyri-səlis qaydanın çıxışı,  $p$ ,  $q$  və  $r$  isə ANFIS öyrənmə alqoritmi ilə tənzimlənə bilən uyğunlaşma parametrləridir. Son diaqnoz həllini göstərən rəqəmli çıxış məlumatları, yəni rotorun qırılmış çubuqlarının sayı bu doqquz qaydaların ayrı-ayrı çıxış məlumatlarından hesablanır. Tədqiqatlar göstərir ki, ANFIS əsasında mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası üsulu xalis qeyri-səlis məntiq sistemi kimi ekvivalent diaqnostik performansını təmin edə bilər. Bununla belə, ANFIS-də qeyri-səlis mənsubiyyət funksiyaları və qeyri-səlis qaydalar sınaq və səhv yolu ilə deyil, təlim məlumatlarından "avtomatik" əldə edilir. Digərləri qeyri-səlis neyron şəbəkəsinə (FALCON - fuzzy adaptive learning control / deci-

sion network) üç fazalı asinxron mühərrikdə sürtünmə nasazlıqlarının aşkarlanması metoduna əsasən müzakirə etmişlər. Onların sxemi müxtəlif yük momenti hallarında diaqnostika/aşkarlamayı təmin edə bilər. İstənilən diaqnostika nəticələrinə əlavə olaraq, təlim keçmiş FALCON-dan qeyri-səlis If-THEN qaydaları baxımından müvafiq evristik biliklər əldə edə bilərsiniz. Əslində, qaydaların alınması qeyri-səlis neyron şəbəkələrin fərqli xüsusiyyətlərindən biridir. FALCON və ANFIS arasında da müqayisə aparılmış və ANFIS-dən istifadə etməklə əldə edilən diaqnoz/ aşkarlamanın FALCON-dan daha dəqiq olduğu göstərilmişdir. Bundan əlavə, ANFIS ilə nasazlığın aşkarlanmasının yaxınlaşma sürəti FALCON ilə müqayisədə daha sürətlidir. Lakin, ANFIS-də diaqnostik biliklərin çıxarılması FALCON-da olduğu kimi asan deyil. Sonda qeyd etmək lazımdır ki, qeyri-səlis neyron şəbəkələri həm neyron şəbəkələrindən, həm də qeyri-səlis məntiqdən daha yaxşı mühərrik nasazlıqlarının aşkar edilməsinin məhsuldarlığını təmin edə bilər və neyron-qeyri-səlis əsaslı nasazlıqların diaqnostikası üçün ideal üsulun FALCON-nun qeyri-səlis qaydalarının yüksək sürətli öyrənmə ilə çıxarılması imkanlarını birləşdirməsi gözlənilir.

Qeyri-səlis neyron şəbəkələri həm neyron şəbəkələrin, həm də qeyri-səlis məntiqin üstünlüklərinə malik olmasına baxmayaraq, ANFIS kimi mövcud modellərin əksəriyyəti qeyri-səlis giriş/çıxış məlumatlarını birbaşa idarə edə bilməz. Digər tədqiqatçılar bu çatışmazlığı aradan qaldırmaq üçün qeyri-səlis çıxış məlumatlarını sadə şəkildə idarə etmək üçün modifikasiya olunmuş ANFIS təklif etdi. Nasazlıqların diaqnostikasının bu sxemi heç bir məlumat çevrilmədən birbaşa ekspertlərdən biliklərin əldə edilməsi ilə səciyyələnir.

## **Genetik alqoritmlər əsasında mühərrikin nasazlıqlarının diaqnostikası**

Genetik alqoritmlər (GA), törəmələri olmadan stoxastik optimallaşdırma üsuludur. Onun oriyentasiyası təbii seçimdən, eləcə də təkamül prosesindən götürülmüş ideyalardan irəli gəlir. Kompleks problemlərin universal həlli olaraq, paralel axtarış və optimallaşdırmanın unikal funksiyalarına malikdir. GA çox vaxt məqsəd funksiyalarının törəmələrini tələb edən adi optimallaşdırma sxemlərinə nisbətən həll ediləcək problemlər haqqında daha az ilkin məlumata ehtiyac duyur [2, 7-12].

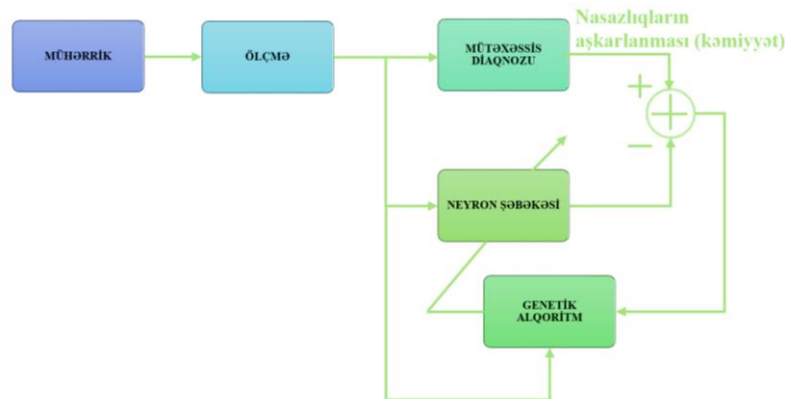
Beləliklə, təkcə BP öyrənmə alqoritmindən istifadə etmək əvəzinə, neyron şəbəkələrin və qeyri-səlis məntiq sistemlərinin parametrlərini və strukturlarını optimallaşdırmaq üçün GA-dan istifadə etmək məqsəduyğundur. Prinsipcə, yuxarıda nəzərdən keçirilmiş bütün mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası metodlarının öyrədilməsi (həm yumşaq hesablamalara əsaslanan, həm də ənənəvi həllər daxil olmaqla) GA-lardan istifadə etməklə həyata keçirilə bilər. Neyron şəbəkəsinə əsaslanan mühərriki nasazlığının diaqnostikası sxemini optimallaşdırmaq üçün GA-dan istifadənin blok sxemi şəkil 7-də göstərilmişdir.

Əslində, neyron şəbəkənin müəyyənləşdirilməsi və öyrədilməsi üçün iki GA tətbiq olunur: “designer” GA və “trainer” GA. Daha ətraflı desək, neyron şəbəkənin dizayn parametrləri, yəni gizli təbəqələrin sayı və ölçüsü, həmçinin neyron ötürmə funksiyasının xüsusiyyətləri GA dizayneri tərəfindən optimallaşdırılır. Bu iki parametrin konfigurasiya prosedurunda tətbiqi neyron şəbəkənin optimal strukturuna və mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası üçün parametrlərə gətirib çıxarır.

GA hesablaması TMS320C40 DSP çipindən həyata keçirilir ki, bu da diaqnozun cavab müddətini 300 saniyədən az bir müddətdə

göstərir. Diaqnostikanın effektivliyi bir nasazlığın düzgün aşkarlanmasında faizi 98% - dən çoxdur. Bundan əlavə, o həm də baxılan işlə-

rin təxminən 66%-də hər iki nasazlığın düzgün diaqnostikası ilə və halların təxminən 100%-də ən azı bir nasazlığın öhdəsindən gələ bilər.



**Şəkil 7** – Neyron şəbəkələri əsasında mühərrikin nasazlıqlarının diaqnostikasında GA-nın tətbiqi  
**Figure 7** – Application of GA in motor fault diagnosis based on neural networks

Digər tədqiqatçılar isə Elman neyron şəbəkəsindən istifadə edərək mühərrikin nasazlığının aşkarlanması sxemini təklif etdi. BP-nin neyron şəbəkəsindən fərqli olaraq, Elman neyron şəbəkəsi yaddaş qovşaqları və yerli cari birləşmələr sayəsində zaman sıralarını proqnozlaşdırmaq üçün güclü bir qabiliyyətə malikdir. Nasazlıqlar proqnoz xətası gözləntilərinə nəzərəcarpacaq dəyişikliklər nəticəsində aşkar edilir. Daha sonra, proqnozlaşdırma dəqiqliyini artırmaq və beləliklə daha yaxşı nasazlıq aşkarlama performansına nail olmaq məqsədi ilə Elman neyron şəbəkəsi daxilində kontekst qovşaqlarının ilkin çıxış məlumatlarını optimallaşdırmaq üçün GA əsaslı təlim strategiyası tətbiq edilir. Bu metodun effektivliyini yoxlamaq üçün dişli ötürmə (reduktor) mexanizmində süni nasazlıq yaradılaraq kompüter simulyasiyaları aparılır. Nasazlıqların aşkarlanmasının dəqiq nəticələri model haqqında hər hansı ilkin məlumat olmadan əldə edilmişdir. GA köməkçi optimallaşdırma üsulu olduğundan, praktikada müstəqil şəkildə tətbiq edilə bilməz. GA-nın digər mühərrik nasazlığının diaqnostika sxemləri ilə birləşməsi

daha təkmilləşdirilmiş yeni nəzarət sistemlərini yaratdı. Lakin, GA ilə optimallaşdırma tez-tez böyük hesablamalar tələb edir və buna görə də olduqca çox vaxt alır.

Real vaxt rejimində nasazlıqların diaqnostikasına yönəldilmiş, yaxınlaşma sürətini yaxşılaşdırmaq üçün paralel icra ilə sürətli GA-lar hazırlanmalıdır.

## Nəticə

Məqalədə süni intellekt metodlarına əsaslanan mühərrik nasazlığının diaqnostika sistemlərinin son inkişaf texnologiyasını tədqiq olunmuşdur. Neyron şəbəkələri, qeyri-səlis məntiq, neyro-qeyri-səlis və genetik alqoritmlər əsasında mühərrik nasazlığının ən müasir və qeyri-müəyyən informasiya çatışmazlığı hallarında diaqnostikanın mümkünlüyü araşdırılmışdır. Qeyd olunan süni intellekt metodlarının müqayisəli təhlili aparılaraq üstünlükləri və çatışmazlıqları təhlil edilmişdir. Aparılan tədqiqat işinə əsaslanaraq belə qənaətə gəlinir ki, süni intellekt metodları mühərrik nasazlıqlarının diaqnostikası üçün kompleks problemlərin həllində ən perspektivli metod kimi isti-

fadə edilə bilər. Ənənəvi və süni intellekt metodlarının kombinasiyası ilə gələcəkdə daha dəqiq və etibarlı hibrid diaqnostik monitoring sistemlərinin yaradılması və xüsusilə nəqliyyatda istismar olunan elektrik mühərriklərində tətbiqi bu sahədə böyük uğur hesab oluna bilər. Bu məqalə elektrik mühərriklərində süni intellekt metodları əsasında nasazlıqların diaq-

nostikası sahəsində gələcək tədqiqat fəaliyyətlərimiz üçün başlanğıc nöqtəsidir.

### Maraqlar münaqişəsi

Müəllif bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edir.

## REFERENCES

1. **Yusifbəyli N.A., Quliyev H.B., Qasimov R.A.** Paylayıcı elektrik şəbəkələrində reaktiv güc axınlarının qeyri-səlis məntiq nəzəriyyəsi əsasında idarə olunma effektivliyinin artırılması. *Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri*, Cild 8. № 2, 2016, s. 96-105. (in Azerbaijan)
2. **Rahmanov N.R., Kurbackij V.G., Yusifbejli N.A., Guliev G.B., Tomin N.V.** Primenenie algoritmov i modelej mashinnogo obucheniya v zadachah upravleniya rezhimami sovremennyh energosistem // ADNSU, Azərb. *Ali Texniki Məktəblərinin Xəbərləri*, Cild 21, 2019, №2, c.61-72. (in Russian)
3. **Huseynov F.H., Manafov E.K.** Application of artificial intelligence technology in diagnostics of electric motor failures // Материалы VII Международной научно-практической молодежной конференции «Февральские чтения 2022: Творческий потенциал молодежи в решении авиакосмических проблем» Баку, Национальная Академия Авиации, 2-4 февраля 2022 г, с.94-96. (in English)
4. **M.Muruganandam and M.Madheswaran.** Modeling and Simulation of Modified Fuzzy Logic Controller for Various types of DC motor Drives” IEEE international conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation -2009, 4th-6th June 2009. (in English)
5. **Young Im Cho.** “Development of a new Neuro-Fuzzy hybrid system” Industrial Electronics Society, IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE Volume 3, 2-6 Nov. 2004 Page(s):3184 - 3189 Vol. 3 Digital Object Identifiers 10.1109/IECON 2004 .1432322. (in English)
6. **S. K. Pradhan, D. R. Parhi and A. K. Panda.** “Neuro-fuzzy technique for navigation of multiple mobile robots” Springer Science + Business Media, Fuzzy Optim Decis Making, 2006, pp.255–288. (in English)
7. **M. Ali Akcayol.** “Application of adaptive neuro-fuzzy controller for SRM” An International Journal of Advances in Engineering Software, Elsevier, 2004. pp. 129–137. (in English)
8. **Lee J., Abujamra R, Jardine A. K. S, Lin D, Banjevic. D.** An integrated platform for diagnostics, prognostics and maintenance optimization. The IMS 2004 International Conference on Advances in Maintenance and in Modeling, Simulation and Intelligent Monitoring of Degradations, Arles, France; 2004. (in English)
9. **E. Ritchie et al.** “Diagnosis of rotor faults in squirrel cage induction motors using a fuzzy logic approach,” Proceedings of the 1994 International Conference on Electrical Machines, Paris (France), vol. 2, pp. 348-352. (in English)
10. **X.Z. Gao, S.J. Ovaska, Y. Dote.** Motor fault detection using Elman neural network with genetic algorithm-aided training, in: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 2000, Nashville, TN, pp. 2386–2392. (in English)
11. **F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas.** A fuzzy logic approach to on-line induction motor diagnostics based on stator current monitoring, in: Proceedings of Stockholm Powertek, June 1995, Stockholm, Sweden, pp. 150–161. (in English)
12. **F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas.** Integrated condition monitoring and diagnosis of electrical machines using minimum configuration artificial intelligence, in: Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications, September 1997, Trondheim, Norway, pp. 2983–2988. (in English)