

Z-ƏDƏD ƏSASLI SOFT COMPUTING MODELİ İLƏ ENERJİ İSTEHLAKI ANOMALİYALARININ BEŞSƏVİYYƏLİ RISK QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ

Tural Togrul SUFANZADE 

Odlar Yurdu University, Baku, AZ1072, Azerbaijan

E-mail: sufanzade@gmail.com

Received: 6 Mai 2026

Revised: 8 June 2026

Accepted: 25 June 2026

UOT: 620.9:519.876.5

DOI: <https://doi.org/10.32010/AJEC1398>

Xülasə. Məqalədə enerji istehlakı anomaliyalarının Z-ədəd əsaslı soft computing modeli vasitəsilə beşsəviyyəli risk qiymətləndirilməsi məsələsi araşdırılır. Müasir enerji sistemlərində istehlak göstəricilərinin kəskin və ya tədrici dəyişməsi texniki nasazlıqlar, qeyri-səmərəli istifadə, istehsal rejimində dəyişikliklər və xarici mühit amilləri ilə bağlı ola bilər. Bu səbəbdən enerji sərfiyyatında baş verən anomaliyaların yalnız aşkarlanması deyil, həm də onların risk səviyyəsinə görə düzgün təsnif edilməsi mühüm əhəmiyyət daşıyır. Tədqiqatda qeyri-müəyyənlik və natamam informasiya şəraitində qərar qəbul etməni dəstəkləyən Z-ədəd yanaşmasının üstünlükləri əsaslandırılır. Z-ədəd modeli qiymətləndirmə göstəricisi ilə yanaşı, həmin göstəricinin etibarlılıq dərəcəsini də nəzərə aldığından enerji istehlakı risklərinin daha real və çevik müəyyənləşdirilməsinə imkan yaradır. Məqalədə enerji istehlakı anomaliyaları çox aşağı, aşağı, orta, yüksək və çox yüksək risk səviyyələri üzrə qiymətləndirilir. Təklif olunan model qeyri-səlis məntiq, ekspert qiymətləndirmələri və soft computing prinsiplərinə əsaslanaraq enerji idarəetmə sistemlərində erkən xəbərdarlıq, monitoring və profilaktik tədbirlərin planlaşdırılması üçün praktik alət kimi çıxış edir. Tədqiqatın nəticələri göstərir ki, Z-ədəd əsaslı yanaşma klassik statistik metodlarla müqayisədə qeyri-müəyyən verilənlərin emalında daha səmərəli nəticələr verə bilər. Gələcək tədqiqatlarda modelin real enerji istehlakı verilənləri üzərində sınaqdan keçirilməsi və süni intellekt alqoritmləri ilə inteqrasiyası məqsəduyğun hesab olunur.

Açar sözlər: Z-ədəd, soft computing, enerji istehlakı, anomaliya, risk qiymətləndirilməsi, qeyri-səlis məntiq

Giriş

Müasir dövrdə enerji istehlakının səmərəli idarə olunması, anomaliyaların vaxtında aşkarlanması və risk səviyyəsinin düzgün qiymətləndirilməsi enerji təhlükəsizliyi və rəqəmsal idarəetmə sistemləri üçün mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Ağıllı sayğaclar, sensor şəbəkələri və avtomatlaşdırılmış monitoring sistemləri enerji istehlakı haqqında böyük həcmdə məlumatların toplanmasına imkan yaratsa da, bu məlumatlar çox zaman qeyri-dəqiqlik, natamamlıq və qeyri-müəyyənliklə xarakterizə olunur. Belə şəraitdə ənənəvi statistik yanaşmalar enerji istehlakında baş verən kənarlaşmaların risk səviyyəsini tam və çevik şəkildə qiymətləndirmək üçün kifayət etmir. Enerji istehlakı anomaliyaları texniki nasazlıq, ölçmə xətası, qeyri-səmərəli istifadə,

şəbəkə yüklənməsi və ya istehlak davranışında baş verən kəskin dəyişikliklər nəticəsində meydana çıxıb bilər. Bu anomaliyaların sadəcə aşkarlanması deyil, həm də risk səviyyələri üzrə təsnifləndirilməsi idarəetmə qərarlarının daha düzgün qəbul edilməsinə şərait yaradır. Bu baxımdan soft computing yanaşmaları qeyri-dəqiq və qeyri-müəyyən informasiyanın emalı üçün əlverişli elmi-metodoloji əsas yaradır.

Soft computing modelləri klassik hesablamaya yanaşmalarından fərqli olaraq, sərt riyazi sərhədlərə deyil, qeyri-səlislik, ehtimallılıq və intellektual qərar qəbul etmə mexanizmlərinə əsaslanır.

Xüsusilə Z-ədəd konsepsiyası enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsində mühüm əhəmiyyət daşıyır. Z-ədəd iki komponentdən

ibarət olmaqla, bir tərəfdən qiymətləndirilən göstəricinin qeyri-səlis məhdudiyyətini, digər tərəfdən isə həmin qiymətləndirmənin etibarlılıq dərəcəsini ifadə edir [1, s. 2923-2924]. Bu xüsusiyyət enerji istehlakı risklərinin yalnız səviyyə baxımından deyil, həm də qiymətləndirmənin etibarlılığı baxımından təhlilinə imkan verir.

Bu məqalənin əsas məqsədi Z-ədəd əsaslı soft computing modeli vasitəsilə enerji istehlakı anomalialarının beşsəviyyəli risk qiymətləndirilməsi mexanizmini formalaşdırmaqdır. Təklif olunan modeldə enerji istehlakındakı kənarlaşmalar “çox aşağı risk”, “aşağı risk”, “orta risk”, “yüksək risk” və “kritik risk” səviyyələri üzrə qiymətləndirilir. Bu yanaşma qeyri-müəyyənlik və etibarlılıq amillərini birlikdə nəzərə almaqla enerji istehlakı məlumatlarının daha obyektiv təhlilinə, anomaliaların izaholunan şəkildə təsnifləndirilməsinə və risk əsaslı qərar qəbul etmə prosesinin təkmilləşdirilməsinə xidmət edir.

Nəzəri əsaslar

Z-ədəd və soft computing yanaşmasının nəzəri-metodoloji əsasları

Müasir rəqəmsal idarəetmə sistemlərində qərarların qəbul edilməsi getdikcə daha mürəkkəb informasiya mühitində həyata keçirilir. Enerji istehlakı kimi dəyişkən xarakterli proseslərdə daxil olan məlumatlar çox vaxt tam, dəqiq və sabit olmur. Ağıllı sayğaclar, sensor qurğuları və avtomatlaşdırılmış monitorinq sistemləri böyük həcmdə məlumat toplasa da, bu məlumatlarda ölçmə xətalrı, təsadüfi dəyişmələr, qeyri-sabit davranış nümunələri və natamamlıq müşahidə edilə bilər. Belə şəraitdə klassik hesablamə metodları hər zaman real vəziyyəti tam əks etdirmir. Çünki ənənəvi riyazi modellər əsasən dəqiq verilənlərə, sabit parametrlərə və əvvəlcədən müəyyən olunmuş sərt sərhədlərə əsaslanır. Halbuki enerji istehlakı prosesində “normal”, “şübhəli”, “yüksək”, “kritik” kimi anlayışlar çox zaman kəskin sərhədlərlə deyil, nisbi və qeyri-səlis formada ifadə olunur.

Bu baxımdan soft computing yanaşması qeyri-müəyyən, natamam və təxmini informasiyanın emalı üçün mühüm elmi-metodoloji baza yaradır. Soft computing klassik hesablamə modellərindən fərqli olaraq, mütləq dəqiqliyə deyil, praktik baxımdan qənaətbəxş, çevik və izaholu-

nan nəticələrin əldə edilməsinə yönəlir. Bu yanaşmanın əsas tərkib hissələrinə qeyri-səlis məntiq, neyron şəbəkələr, ehtimallı mühakimə, genetik alqoritmlər və hibrid intellektual modellər daxildir. Soft computing sistemləri xüsusilə o hallarda effektiv hesab olunur ki, proses tam müəyyənləşdirilə bilmir, məlumatlar səs-küylüdür və qərarların qəbulunda ekspert biliklərinin nəzərə alınması tələb olunur.

Qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsi soft computing yanaşmasının əsas nəzəri sütunlarından biridir. Bu nəzəriyyə obyektlərin yalnız “daxildir” və ya “daxil deyil” kimi ikili məntiq əsasında deyil, müəyyən mənsubiyyət dərəcəsi üzrə qiymətləndirilməsinə imkan verir. Məsələn, enerji istehlakı göstəricisi klassik yanaşmada ya “normal”, ya da “anomaliya” kimi qəbul edilə bilər. Qeyri-səlis yanaşmada isə həmin göstərici müəyyən dərəcədə “normal”, müəyyən dərəcədə “riskli”, müəyyən dərəcədə isə “kritik” kimi qiymətləndirilə bilər. Bu, real proseslərin daha çevik və insan düşüncəsinə yaxın şəkildə modelləşdirilməsinə şərait yaradır. Zadəh tərəfindən irəli sürülmüş qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsi qeyri-müəyyən informasiyanın formal riyazi təsviri üçün əsas yaratmış və sonradan müxtəlif intellektual qərar qəbul etmə modellərinin inkişafına təsir göstərmişdir [7, s. 338-353].

Enerji istehlakının təhlilində qeyri-səlis yanaşmanın tətbiqi ona görə aktualdır ki, istehlak davranışı yalnız texniki göstəricilərlə deyil, həm də istifadəçi davranışı, mövsümi dəyişiklik, tarif siyasəti, avadanlıqların vəziyyəti və xarici mühit amilləri ilə bağlıdır. Məsələn, eyni enerji istehlakı səviyyəsi bir halda normal hesab oluna bilər, digər halda isə riskli vəziyyət kimi qiymətləndirilə bilər. Bu fərq istifadəçinin tipi, istehlak vaxtı, əvvəlki davranış nümunələri və sistemin ümumi yüklənməsi ilə əlaqəli ola bilər. Buna görə də enerji istehlakı anomalialarının qiymətləndirilməsi zamanı yalnız rəqəmsal göstəriciyə əsaslanmaq kifayət etmir; həmin göstəricinin konteksti, etibarlılığı və risk yaratma ehtimalı da nəzərə alınmalıdır.

Z-ədəd əsaslı yanaşma məhz bu ehtiyacı nəzərə alan daha inkişaf etmiş qeyri-səlis qiymətləndirmə mexanizmi kimi çıxış edir. Z-ədədin əsas üstünlüyü ondan ibarətdir ki, o, yalnız qiymətləndirilən göstəricinin qeyri-səlis səviyyəsini deyil, həm də həmin qiymətləndirməyə olan etibarlılıq dərəcəsini

nəzərə alır. Başqa sözlə, enerji istehlakında müşahidə edilən kənarlaşma “yüksək risk” kimi qiymətləndirilsə, model eyni zamanda bu qiymətləndirmənin nə dərəcədə etibarlı olduğunu da göstərməlidir. Bu yanaşma enerji sistemlərində qərar qəbul etmənin daha əsaslandırılmış və çevik olmasına imkan verir.

Z-ədəd əsaslı modeldə iki mühüm məqam xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Birinci məqam qeyri-səlis məhdudiyyətin müəyyən edilməsidir. Bu mərhələdə enerji istehlakı göstəricilərinin risk səviyyələri üzrə linqvistik təsnifatı aparılır. Məsələn, istehlak fərqi “aşağı”, “orta”, “yüksək” və “kritik” kimi ifadə edilə bilər. İkinci məqam isə bu qiymətləndirməyə olan etibarlılığın müəyyənəşdirilməsidir. Etibarlılıq dərəcəsi məlumatın keyfiyyətindən, ölçmənin düzgünlüyündən, saygac göstəricilərinin sabitliyindən, müşahidə intervalından və ekspert qiymətləndirməsinin dəqiqliyindən asılı ola bilər. Bu iki komponentin birlikdə nəzərə alınması enerji istehlakı anomaliyalarının daha real qiymətləndirilməsini təmin edir.

Soft computing yanaşmasının enerji istehlakı sistemlərində tətbiqi həm nəzəri, həm də praktik baxımdan mühüm əhəmiyyətə malikdir. Nəzəri baxımdan bu yanaşma qeyri-müəyyənlik, risk və etibarlılıq anlayışlarını vahid model daxilində birləşdirməyə imkan verir. Praktik baxımdan isə enerji istehlakı məlumatlarının emalında daha çevik xəbərdarlıq, risk təsnifatı və qərar dəstəyi mexanizmlərinin qurulmasına şərait yaradır. Xüsusilə böyük verilənlər mühitində enerji istehlakı göstəricilərinin real vaxt rejimində təhlili üçün sadə statistik sərhədlər kifayət etmir. Çünki istehlakın ani artması hər zaman təhlükəli anomaliya demək deyil; bəzi hallarda bu artım mövsümi tələbat, texniki proses və ya istifadəçi davranışının qanunauyğun dəyişməsi ilə əlaqəli ola bilər. Buna görə də model həm kənarlaşmanı, həm də onun risk mahiyyətini qiymətləndirməlidir.

Bu yanaşmanın digər mühüm üstünlüyü izaholunanlıqdır. Enerji sistemlərində qəbul edilən qərarlar yalnız avtomatik nəticəyə əsaslanmamalı, həm də həmin nəticənin səbəbi izah edilə bilməlidir. Məsələn, sistem “kritik risk” müəyyən edirsə, idarəedici şəxs və ya mütəxəssis bunun hansı göstəricilərə əsaslandığını bilməlidir. Qeyri-səlis və Z-ədəd əsaslı modellər bu baxımdan üstünlük təşkil edir, çünki onlar

nəticələri linqvistik qaydalar vasitəsilə təqdim etməyə imkan verir. Məsələn: “Əgər istehlak kəskin artıbsa və məlumatın etibarlılığı yüksəkdirsə, risk kritkdir”; yaxud “Əgər istehlak orta dərəcədə artıbsa, lakin məlumat etibarlılığı aşağıdırsa, risk səviyyəsi yenidən yoxlanılmalıdır”. Bu cür qaydalar enerji idarəetmə sistemlərində qərarların daha anlaşılan və şəffaf olmasına kömək edir.

Enerji istehlakı məlumatlarının təhlilində süni intellekt və maşın öyrənməsi metodlarının geniş yayılması soft computing modellərinin aktuallığını daha da artırır. Tədqiqatlarda enerji sistemlərində anomaliya aşkarlanması üçün süni intellekt əsaslı yanaşmaların effektivliyi xüsusi vurğulanır. Bu metodlar böyük həcmli məlumatlardan qeyri-adi davranış nümunələrini müəyyən etməyə, enerji itkilərini azaltmağa və səmərəliliyi artırmağa imkan verir [2]. Lakin bir çox maşın öyrənməsi modelləri nəticənin niyə formalaşdığını izah etməkdə zəif ola bilər. Soft computing və xüsusilə qeyri-səlis qayda əsaslı yanaşmalar bu problemi qismən aradan qaldırır, çünki onlar qərar prosesini insan üçün anlaşılan qaydalar formasında qurmağa imkan verir.

Beləliklə, Z-ədəd əsaslı soft computing modeli enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsində iki mühüm funksiyanı yerinə yetirir. Birincisi, qeyri-səlislik və dəyişkənlik şəraitində enerji istehlakının risk səviyyəsini müəyyən edir. İkincisi, bu qiymətləndirmənin etibarlılığını nəzərə alaraq qərarın daha əsaslandırılmış olmasını təmin edir. Bu isə enerji sistemlərində risk əsaslı idarəetmənin inkişafı üçün mühüm nəzəri baza yaradır.

Enerji istehlakı anomaliyalarının risk əsaslı qiymətləndirilməsinin nəzəri aspektləri

Enerji istehlakı anomaliyası dedikdə, müəyyən istifadəçi, obyekt, bina və ya sistem üzrə əvvəlki istehlak davranışından əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənən qeyri-adi göstəricilər başa düşülür. Bu anomaliyalar müxtəlif səbəblərlə bağlı ola bilər. Onların bir qismi texniki nasazlıqlardan, saygac və sensor xətələrindən, rabitə problemlərindən və ya məlumat ötürülməsində yaranan boşluqlardan qaynaqlanır. Digər qismi isə qeyri-səmərəli istifadə, enerji itkisi, qeyri-qanuni müdaxilə və ya istehlak davranışının kəskin dəyişməsi ilə əlaqədardır. Ona görə də enerji istehlakı anomaliyalarının təhlili yalnız texniki

məsələ deyil, həm də idarəetmə, təhlükəsizlik və risk qiymətləndirməsi məsələsidir. Enerji istehlakı sahəsində anomaliya aşkarlanmasının aktuallığı ağıllı şəbəkələrin, smart sayğacların və real vaxt monitoring sistemlərinin inkişafı ilə daha da artmışdır. Ənənəvi enerji sistemlərində istehlak məlumatları daha gec intervallarla toplanırdısa, müasir sistemlərdə məlumatlar qısa zaman aralıqlarında və daha yüksək dəqiqliklə əldə edilir. Bu isə həm üstünlük, həm də çətinlik yaradır. Üstünlük ondan ibarətdir ki, sistemdə baş verən qeyri-adi dəyişiklikləri daha tez müəyyən etmək mümkün olur. Çətinlik isə böyük həcmli məlumatların emalı, yanlış siqnalların azaldılması və real risk yaradan halların adi dəyişmələrdən fərqləndirilməsi ilə bağlıdır. Anomaliya aşkarlanması üzrə tədqiqatlarda əsas problemlərdən biri normal və qeyri-normal davranış arasındakı sərhədin müəyyənləşdirilməsidir. Enerji istehlakında bu sərhəd sabit olmaya bilər. Məsələn, qış aylarında istilik sistemlərinin istifadəsi nəticəsində enerji istehlakı artır və bu artım normal hesab olunur. Lakin eyni artım yay aylarında və ya gecə saatlarında müşahidə edildikdə anomaliya kimi qiymətləndirilə bilər. Bu səbəbdən enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsi zaman, məkan, istifadəçi profili və əvvəlki istehlak tarixi ilə əlaqəli aparılmalıdır. Ağıllı enerji sistemlərində süni intellekt əsaslı anomaliya aşkarlanması bu cür mürəkkəb əlaqələrin təhlilinə imkan yaradır [2]. Risk əsaslı yanaşma anomaliya aşkarlanmasını daha praktik idarəetmə mexanizminə çevirir. Əgər sistem yalnız anomaliyanın olub-olmadığını müəyyən edərsə, bu məlumat idarəetmə qərarı üçün kifayət etməyə bilər. Çünki bütün anomaliyalar eyni təhlükə səviyyəsinə malik deyil. Bəzi anomaliyalar kiçik ölçmə xətası və ya qısa müddətli dəyişmə ilə bağlı ola bilər. Digərləri isə ciddi enerji itkisi, avadanlıq nasazlığı və ya təhlükəsizlik problemi yarada bilər. Buna görə də anomaliyaların risk səviyyələri üzrə təsnifləndirilməsi mühüm əhəmiyyət daşıyır.

Beşsəviyyəli risk qiymətləndirməsi enerji istehlakı anomaliyalarının sistemli şəkildə təsnifləndirilməsi üçün əlverişli model hesab oluna bilər. Bu modeldə anomaliyalar “çox aşağı risk”, “aşağı risk”, “orta risk”, “yüksək risk” və “kritik risk” səviyyələri üzrə qruplaşdırılır. “Çox aşağı risk” səviyyəsi adətən kiçik və təsadüfi

dəyişmələri ifadə edir. Bu halda xüsusi müdaxiləyə ehtiyac olmaya bilər, lakin məlumat müşahidə altında saxlanılır. “Aşağı risk” səviyyəsində kənarlaşma müəyyən olunur, lakin onun sistem üçün ciddi təhlükə yaratma ehtimalı azdır. “Orta risk” səviyyəsində əlavə yoxlama və təhlil tələb olunur. “Yüksək risk” səviyyəsində operativ müdaxilə zəruri ola bilər. “Kritik risk” isə ciddi anomaliya, yüksək etibarlılıq və potensial itki ehtimalı ilə xarakterizə edilir. Bu cür beşsəviyyəli qiymətləndirmə enerji idarəetmə sistemlərinə prioritetləşdirmə imkanı verir. Məsələn, sistemdə eyni vaxtda bir neçə anomaliya aşkar olunarsa, resurslar ilk növbədə yüksək və kritik riskli halların araşdırılmasına yönəldilir. Bu yanaşma həm vaxt itkisini azaldır, həm də idarəetmə qərarlarının səmərəliliyini artırır. Enerji sistemlərində resursların məhdudluğu nəzərə alındıqda risk səviyyəsinə əsaslanan prioritetləşdirmə mühüm praktik əhəmiyyət daşıyır.

Enerji istehlakı anomaliyalarının risk qiymətləndirilməsində qeyri-texniki itkilərin müəyyən edilməsi də mühüm yer tutur. Elektrik enerjisi sahəsində qeyri-texniki itkilər saygac manipulyasiyası, qeyri-qanuni qoşulma, düzgün olmayan ölçmə və ya məlumatların saxtalaşdırılması ilə bağlı ola bilər. Bu istiqamətdə aparılmış tədqiqatlarda istehlakçı davranış nümunələrinin təhlili əsasında şübhəli halların müəyyən edilməsinin mümkünlüyü göstərilmişdir [3, s. 216-226]. Bu yanaşma göstərir ki, enerji istehlakı məlumatlarında anomaliyalar yalnız texniki nasazlıq deyil, həm də idarəetmə və təhlükəsizlik riski kimi qiymətləndirilməlidir.

Bəzi tədqiqatlarda qeyri-texniki itkilərin aşkarlanması üçün dəstək vektor maşınları və digər maşın öyrənməsi metodlarından istifadə edilmişdir. Bu metodlar istehlakçıların normal davranış nümunələrini öyrənərək onlardan kənarlaşan halları müəyyən etməyə imkan verir [4, s. 1162-1171]. Lakin belə modellərdə əsas problem nəticələrin izaholunamlılığı və risk səviyyəsinə çevrilməsidir. Yəni model anomaliyanı aşkar edə bilər, lakin onun nə dərəcədə təhlükəli olduğunu ayrıca qiymətləndirmək lazım gəlir. Bu məqam Z-ədəd əsaslı soft computing yanaşmasının üstünlüyünü göstərir. Çünki təklif olunan model anomaliyanın mövcudluğunu deyil, onun risk səviyyəsini və qiymətləndirmənin etibarlılığını birlikdə nəzərə alır. Enerji oğurluğu

və qeyri-texniki itkilərlə bağlı araşdırmalarda smart sayğac əsaslı yanaşmaların bu problemlərin azaldılmasında mühüm rol oynadığı qeyd edilir [5, s. 1007-1015]. Smart sayğacın istehlak haqqında daha dəqiq və tez-tez yenilənən məlumat təqdim etdiyinə görə, anomaliyaların aşkarlanması üçün geniş imkan yaradır. Bununla belə, smart sayğac məlumatlarının çoxluğu və dəyişkənliyi yeni problemlər də yaradır. Böyük həcmdə məlumatın içərisindən real risk daşıyan halların seçilməsi üçün sadəcə kənarlaşma aşkarlamaq kifayət etmir. Burada riskin səviyyəsi, davam etmə müddəti, təsir miqyası və məlumatın etibarlılığı birlikdə qiymətləndirilməlidir.

Real vaxt rejimində anomaliya aşkarlanması enerji idarəetmə sistemləri üçün xüsusi əhəmiyyət daşıyır. Çünki bəzi anomaliyalar vaxtında aşkar edilmədikdə daha böyük itkilərə və sistem pozuntularına səbəb ola bilər. Axın verilənləri üzərində aparılan tədqiqatlarda real vaxt anomaliya aşkarlanması üçün nəzarətsiz öyrənmə yanaşmalarının tətbiqi diqqət cəlb edir [6, s. 134-147]. Bu yanaşmalar əvvəlcədən işarələnmiş məlumatların olmadığı hallarda da qeyri-adi davranış nümunələrini müəyyən etməyə imkan verir. Enerji istehlakı sistemlərində bu xüsusiyyət vacibdir, çünki bütün mümkün anomaliya növlərini əvvəlcədən müəyyənləşdirmək və işarələmək çətinidir.

Nəzarətsiz və yarımnezarətli modellərin nəticələri idarəetmə baxımından əlavə şərh tələb edir. Məsələn, model müəyyən göstəricini anomaliya kimi qeyd etdikdə, mütəxəssis həmin anomaliyanın səbəbini və risk səviyyəsini qiymətləndirməlidir. Z-ədəd əsaslı soft computing modeli bu prosesi avtomatlaşdırılmış qərar dəstəyi səviyyəsinə qaldıra bilər. Model istehlak fərqi, dəyişmənin davam etmə müddəti, əvvəlki istehlak davranışı və məlumat etibarlılığı kimi parametrləri nəzərə alaraq yekun risk səviyyəsini müəyyən edir.

Enerji istehlakı anomaliyalarının beşsəviyyəli risk qiymətləndirilməsi aşağıdakı nəzəri məntiqə əsaslanı bilər. Əvvəlcə faktiki istehlak göstəricisi gözlənilən və ya normal istehlak səviyyəsi ilə müqayisə olunur. Daha sonra kənarlaşmanın ölçüsü müəyyən edilir. Bu kənarlaşma qeyri-səlis linqvisitik dəyişənlərə çevrilir: “çox zəif kənarlaşma”, “zəif kənarlaşma”, “orta kənarlaşma”, “güclü kənarlaşma” və “çox güclü kənarlaşma”. Sonra məlumatın etibarlılığı ayrıca

qiymətləndirilir. Etibarlılıq “aşağı”, “orta” və “yüksək” kimi ifadə oluna bilər. Nəticədə Z-ədəd əsaslı qayda bazası vasitəsilə yekun risk səviyyəsi müəyyən edilir. Məsələn, əgər istehlak kənarlaşması çox güclüdürsə və məlumatın etibarlılığı yüksəkdirsə, sistem “kritik risk” nəticəsi verə bilər. Əgər kənarlaşma orta səviyyədədirsə, lakin məlumat etibarlılığı aşağıdırsa, risk “orta” və ya “yenidən yoxlama tələb edən” səviyyədə qiymətləndirilə bilər. Belə yanaşma yanlış xəbərdarlıqların azaldılmasına kömək edir. Çünki yalnız kənarlaşmanın böyüklüyü deyil, həmin kənarlaşmanın etibarlı məlumat əsasında müəyyən edilib-edilməməsi də nəzərə alınır.

Risk qiymətləndirməsinin nəzəri aspektlərindən biri də modelin qərar qəbul etmə prosesinə inteqrasiyasıdır. Beşsəviyyəli risk modeli yalnız analitik nəticə verməməli, həm də idarəetmə reaksiyasını müəyyənləşdirməyə imkan yaratmalıdır. Məsələn, çox aşağı risk səviyyəsində yalnız avtomatik müşahidə davam etdirilir. Aşağı riskdə məlumat qeydiyyata alınır və növbəti dövrlə müqayisə edilir. Orta riskdə əlavə yoxlama və texniki təhlil aparılır. Yüksək riskdə mütəxəssisə xəbərdarlıq göndərilir. Kritik riskdə isə operativ müdaxilə, sistem yoxlaması və mümkün təhlükənin aradan qaldırılması tələb olunur. Bu ardıcılıq risk qiymətləndirməsinə praktik idarəetmə alətinə çevirir. Enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsində təklif olunan yanaşmanın üstünlüyü ondan ibarətdir ki, model həm süni intellekt əsaslı aşkarlama metodlarının imkanlarını, həm də qeyri-səlis qərar qəbul etmənin izaholunamlılığını birləşdirir. Mövcud tədqiqatlar göstərir ki, enerji istehlakı məlumatlarında anomaliyaların aşkarlanması üçün süni intellekt modelləri səmərəli nəticələr verə bilər [2]. Digər tərəfdən, qeyri-texniki itkilərin və şübhəli istehlak davranışlarının müəyyənləşdirilməsi üçün istehlak nümunələrinin təhlili mühüm əhəmiyyət daşıyır [3, s. 216-226; 4, s. 1162-1171]. Smart sayğac əsaslı yanaşmalar isə enerji ödənişinin və ölçmə problemlərinin aşkarlanmasında mühüm informasiya bazası yaradır [5, s. 1007-1015]. Real vaxt rejimində anomaliya aşkarlanması üzrə yanaşmalar da sistemin operativliyini artırır [6, s. 134-147]. Bütün bu istiqamətlər Z-ədəd əsaslı soft computing modelinin formalaşdırılması üçün nəzəri və metodoloji baza rolunu oynayır.

Beləliklə, enerji istehlakı anomaliyalarının risk əsaslı qiymətləndirilməsi yalnız texniki təhlil deyil, həm də qeyri-müəyyənlik şəraitində qərar qəbul etmə problemidir. Bu problemə Z-ədəd əsaslı soft computing yanaşması ilə yanaşmaq enerji sistemlərində daha çevik, etibarlı və izaholunan qiymətləndirmə mexanizmi yaratmağa imkan verir. Təklif olunan beşsəviyyəli risk modeli enerji istehlakında baş verən kənarlaşmaları sadəcə anomaliya kimi deyil, idarəetmə üçün əhəmiyyət daşıyan risk kateqoriyaları kimi qiymətləndirir. Bu isə enerji səmərəliliyinin artırılması, itkilərin azaldılması və qərar qəbul etmə prosesinin təkmilləşdirilməsi baxımından mühüm elmi-praktik əhəmiyyətə malikdir.

Tədqiqat metodları

Tədqiqatda enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsi üçün üç əsas metoddan istifadə edilmişdir.

1. Məlumatların toplanması və ilkin emalı metodu. Bu mərhələdə enerji istehlakı üzrə gündəlik və ya saatlıq göstəricilər toplanır. Məlumatlarda boşluqlar, təkrar göstəricilər və texniki səhvlər yoxlanılır. Daha sonra orta istehlak səviyyəsi müəyyən edilir və sonrakı təhlil üçün baza yaradılır.

2. Statistik müqayisə metodu. Bu metod vasitəsilə faktiki enerji istehlakı orta göstərici ilə müqayisə olunur. Əgər istehlak normadan ciddi şəkildə fərqlənsə, həmin hal anomaliya kimi qəbul edilir. Məsələn, 20-40% fərq aşağı, 40-60% fərq orta, 60-80% fərq yüksək, 80%-dən artıq fərq isə kritik anomaliya kimi qiymətləndirilə bilər.

3. Z-ədəd əsaslı qeyri-səlis qiymətləndirmə metodu. Bu mərhələdə aşkar edilən anomaliyalar risk səviyyələrinə bölünür. Z-ədəd yanaşması

həm anomaliyanın dərəcəsini, həm də həmin qiymətləndirməyə olan etibarlılığı nəzərə alır. Nəticədə enerji istehlakı anomaliyaları beş səviyyə üzrə qiymətləndirilir: çox aşağı risk, aşağı risk, orta risk, yüksək risk və kritik risk.

4. Təhlil və hesablamalar

Enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsi üçün nümunə olaraq gündəlik enerji sərfiyyatı göstəriciləri götürülmüşdür. Hesablama zamanı normativ gündəlik istehlak 100 kVt·saat qəbul edilmişdir. Faktiki istehlak bu göstərici ilə müqayisə olunmuş, kənarlaşma faizi və Z-ədəd əsaslı risk balı hesablanmışdır.

Kənarlaşma faizi aşağıdakı düsturla müəyyən edilmişdir:

$$D = \frac{|\text{Faktiki istehlak} - \text{Normativ istehlak}|}{\text{Normativ istehlak}} \times 100$$

Burada D enerji istehlakında kənarlaşma faizini göstərir.

Z-ədəd əsaslı qiymətləndirmədə yalnız kənarlaşma deyil, həm də məlumatın etibarlılığı nəzərə alınmışdır:

$$Z = (A, B)$$

Burada A - anomaliyanın səviyyəsi, B - məlumatın etibarlılıq əmsalıdır.

Yekun risk balı isə belə hesablanmışdır:

$$\text{Risk balı} = D \times B$$

Risk səviyyələri aşağıdakı kimi müəyyən edilmişdir:

Risk balı	Risk səviyyəsi
0-20	Çox aşağı risk
21-40	Aşağı risk
41-60	Orta risk
61-80	Yüksək risk
81 və daha çox	Kritik risk

Cədvəl 1. Enerji istehlakı anomaliyalarının Z-ədəd əsaslı risk qiymətləndirilməsi

Gün	Normativ istehlak, kVt·saat	Faktiki istehlak, kVt·saat	Kənarlaşma, %	Etibarlılıq əmsalı B	Risk balı	Risk səviyyəsi
1	100	108	8	0.95	7.6	Çox aşağı risk
2	100	125	25	0.90	22.5	Aşağı risk
3	100	145	45	0.92	41.4	Orta risk
4	100	160	60	0.88	52.8	Orta risk

5	100	175	75	0.90	67.5	Yüksək risk
6	100	190	90	0.94	84.6	Kritik risk
7	100	70	30	0.85	25.5	Aşağı risk
8	100	55	45	0.95	42.7	Orta risk
9	100	150	50	0.75	37.5	Aşağı risk
10	100	182	82	0.78	64.0	Yüksək risk

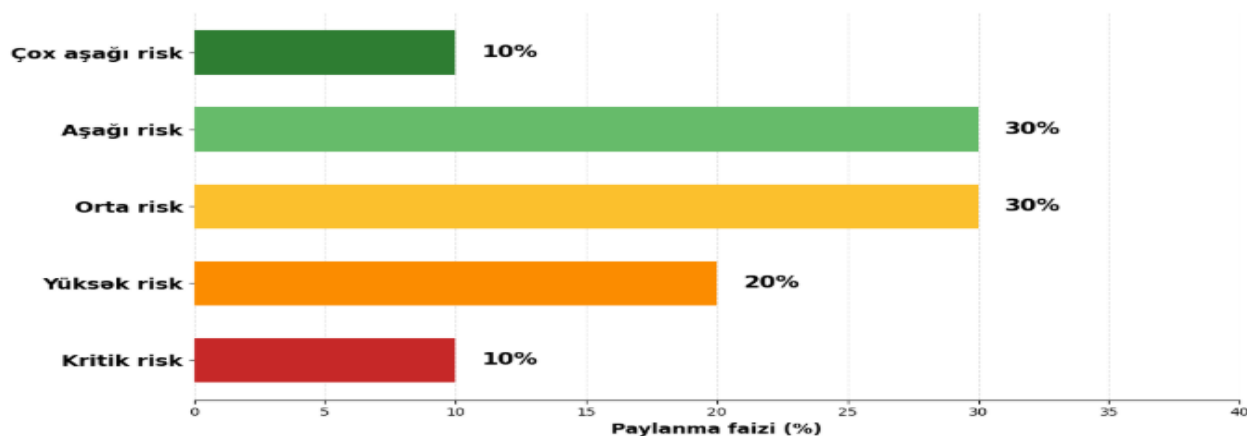
Cədvəldən göründüyü kimi, enerji istehlakı normativ göstəricidən fərqləndikcə risk balı artır. Lakin burada yalnız kənarlaşma faizi əsas götürülmür. Məlumatın etibarlılıq əmsalı da nəticəyə təsir edir. Məsələn, 9-cu gündə faktiki istehlak 150 kVt·saat olmuş və kənarlaşma 50% təşkil etmişdir. Lakin etibarlılıq əmsalı 0.75 olduğu üçün yekun risk balı 37.5 alınmış və bu hal “aşağı risk” kimi qiymətləndirilmişdir. Bu, Z-ədəd yanaşmasının üstünlüyünü göstərir. Çünki model yalnız anomaliyanın miqdarını deyil, həmin məlumatın nə dərəcədə etibarlı olduğunu da nəzərə alır.

Ən yüksək risk 6-cı gündə müşahidə edilmişdir. Həmin gün faktiki enerji istehlakı 190 kVt·saat olmuş, normativ göstəricidən

kənarlaşma 90% təşkil etmişdir. Etibarlılıq əmsalı 0.94 olduğuna görə risk balı 84.6 hesablanmış və bu göstərici “kritik risk” səviyyəsinə aid edilmişdir. Bu hal real şəraitdə texniki nasazlıq, qeyri-səmərəli enerji istifadəsi, sayğac problemi və ya qeyri-adi istehlak davranışı kimi izah oluna bilər.

Cədvəl 2. Risk səviyyələri üzrə ümumi nəticələr

Risk səviyyəsi	Günlərin sayı	Pay, %
Çox aşağı risk	1	10%
Aşağı risk	3	30%
Orta risk	3	30%
Yüksək risk	2	20%
Kritik risk	1	10%
Cəmi	10	100%



Z-ədəd əsaslı soft computing modeli üzrə beşsəviyyəli risk qiymətləndirilməsi

Diagram 1. Risk səviyyələri üzrə paylanma

Aparılan hesablamalar göstərir ki, təhlil edilən 10 günlük dövr üzrə enerji istehlakı göstəricilərinin 30%-i aşağı risk, 30%-i orta risk, 20%-i yüksək risk, 10%-i isə kritik risk səviyyəsinə aiddir. Bu nəticə onu göstərir ki, enerji istehlakında müşahidə edilən kənarlaşmalar təsadüfi xarakter daşımır və onların müəyyən hissəsi idarəetmə baxımından diqqət tələb edir.

Z-ədəd əsaslı soft computing yanaşmasının əsas üstünlüyü ondan ibarətdir ki, o, enerji istehlakı anomaliyalarını sadəcə “normal” və ya “anormal” kimi ayırmır. Model hər bir kənarlaşmanı risk dərəcəsinə görə

qiymətləndirir və qərar qəbul edən şəxsə daha aydın nəticə təqdim edir. Bu yanaşma enerji sistemlərində erkən xəbərdarlıq, texniki nəzarət və resursların düzgün yönləndirilməsi üçün praktik əhəmiyyət daşıyır.

Müzakirə

Aparılan tədqiqat nəticələri göstərir ki, enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsində yalnız kəmiyyət göstəricilərinə əsaslanmaq kifayət etmir. Enerji sistemlərində istehlak davranışı müxtəlif xarici və daxili amillərin təsiri altında dəyişdiyindən

qeyri-müəyyənlik, natamam informasiya və ekspert mühakimələri risk qiymətləndirilməsi prosesində mühüm rol oynayır. Bu baxımdan Z-ədəd əsaslı soft computing yanaşması həm məlumatın qiymətini, həm də həmin məlumatın etibarlılıq səviyyəsini nəzərə almağa imkan verir [7].

Ənənəvi risk qiymətləndirmə metodları adətən sərt sərhədlərə və dəqiq verilənlərə əsaslandığı üçün enerji istehlakında müşahidə olunan qeyri-sabitlikləri tam ifadə edə bilmir. Halbuki real enerji sistemlərində anomaliyalar bəzən ani sıçrayış, bəzən isə tədrici dəyişmə formasında meydana çıxır. Bu səbəbdən qeyri-səlis məntiq və soft computing metodlarının tətbiqi risk səviyyələrinin daha çevik və obyektiv müəyyənləşdirilməsinə şərait yaradır [8].

Təklif olunan beşsəviyyəli risk qiymətləndirmə modeli enerji istehlakı göstəricilərini “çox aşağı”, “aşağı”, “orta”, “yüksək” və “çox yüksək” risk səviyyələri üzrə təsnif etməyə imkan verir. Bu yanaşma qərar qəbul edən şəxslərə yalnız anomaliyanın mövcudluğunu deyil, həm də onun təhlükə dərəcəsini müəyyən etməyə kömək edir. Beləliklə, enerji idarəetmə sistemlərində profilaktik tədbirlərin vaxtında görülməsi və resursların daha səmərəli bölüşdürülməsi mümkün olur [9]. Z-ədəd yanaşmasının əsas üstünlüyü ondan ibarətdir ki, burada ekspert qiymətləndirmələrinin etibarlılığı ayrıca nəzərə alınır. Məsələn, enerji istehlakında kəskin artım müşahidə edildikdə bu artımın texniki nasazlıq, mövsümi dəyişiklik və ya istehsal prosesinin intensivləşməsi ilə bağlı olub-olmaması müxtəlif etibarlılıq dərəcələri ilə qiymətləndirilə bilər. Bu isə modelin real şəraitə uyğunlaşma imkanlarını artırır [10].

Tədqiqatın nəticələri göstərir ki, soft computing əsasında qurulan modellər enerji istehlakının monitorinqində, anomaliyaların erkən aşkarlanmasında və risklərin mərhələli təsnifatında effektiv alət kimi istifadə oluna bilər. Xüsusilə böyük həcmli və qeyri-sabit enerji verilənlərinin təhlilində bu tip modellər klassik statistik yanaşmalardan daha çevik nəticələr təqdim edir [11].

Modelin tətbiqi zamanı verilənlərin keyfiyyəti, ekspert biliklərinin düzgün formalaşdırılması və risk səviyyələri üçün müəyyən edilən meyarların əsaslandırılması

mühüm əhəmiyyət daşıyır. Gələcək tədqiqatlarda təklif olunan modelin real enerji istehlakı bazaları üzərində sınaqdan keçirilməsi, maşın öyrənməsi metodları ilə integrasiyası və müxtəlif sənaye sahələrində tətbiq imkanlarının müqayisəli şəkildə araşdırılması məqsəduyğun hesab olunur [12].

Nəticə

Tədqiqat nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, enerji istehlakı anomaliyalarının qiymətləndirilməsi müasir enerji idarəetmə sistemlərində mühüm elmi və praktiki əhəmiyyət daşıyır. Enerji sərfiyyatında baş verən kəskin və ya tədrici dəyişikliklər texniki nasazlıq, qeyri-səmərəli istifadə, istehsal prosesində dəyişiklik və ya xarici amillərlə bağlı ola bilər. Bu baxımdan anomaliyaların yalnız aşkarlanması deyil, həm də onların risk səviyyələrinə görə düzgün təsnif edilməsi vacibdir.

Məqalədə təklif edilən Z-ədəd əsaslı soft computing modeli qeyri-müəyyənlik və natamam informasiya şəraitində enerji istehlakı risklərinin daha çevik və əsaslandırılmış qiymətləndirilməsinə imkan verir. Z-ədəd yanaşması həm qiymətləndirmə göstəricisini, həm də həmin qiymətləndirmənin etibarlılıq dərəcəsini nəzərə aldığı üçün klassik metodlarla müqayisədə daha real nəticələrin əldə olunmasına şərait yaradır.

Tədqiqatda enerji istehlakı anomaliyalarının beşsəviyyəli risk qiymətləndirilməsi modeli formalaşdırılmışdır. Bu model riskləri çox aşağı, aşağı, orta, yüksək və çox yüksək səviyyələr üzrə təsnif etməyə imkan verir. Belə yanaşma enerji sistemlərində qərar qəbul etmə prosesini asanlaşdırır, anomaliyaların təhlükə dərəcəsini müəyyənləşdirir və qabaqlayıcı tədbirlərin vaxtında görülməsinə kömək edir.

Əldə olunan nəticələr göstərir ki, soft computing metodlarının enerji istehlakı sahəsinə tətbiqi monitorinq, proqnozlaşdırma və risklərin idarə olunması baxımından səmərəli yanaşmadır. Təklif olunan model enerji resurslarından daha rəşional istifadəni, texniki itkilərin azaldılmasını və enerji təhlükəsizliyinin gücləndirilməsini dəstəkləyə bilər.

Gələcək tədqiqatlarda modelin real enerji istehlakı verilənləri üzərində sınaqdan keçirilməsi, müxtəlif obyektlər və sənaye sahələri üzrə müqayisəli təhlillərin aparılması, həmçinin maşın öyrənməsi və süni intellekt

alqoritmləri ilə integrasiyası məqsəduyğun hesab olunur.

ƏDƏBİYYAT SIYAHISI:

1. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. - 1965. - Vol. 8, No. 3. - pp. 338-353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
2. Zadeh L.A. A note on Z-numbers // Information Sciences. - 2011. - Vol. 181, No. 14. - pp. 2923-2932. DOI: 10.1016/j.ins.2011.02.022.
3. Aliev R.A. Fundamentals of the Fuzzy Logic-Based Generalized Theory of Decisions. - Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. - Studies in Fuzziness and Soft Computing, Vol. 293. DOI: 10.1007/978-3-642-34895-2.
4. Aliev R.A., Huseynov O.H. Decision Theory with Imperfect Information. - Singapore: World Scientific, 2014. - 444 p. DOI: 10.1142/9186.
5. Aliev R.A., Pedrycz W., Fazlollahi B., Huseynov O.H., Alizadeh A.V., Guirimov B.G. Fuzzy logic-based generalized decision theory with imperfect information // Information Sciences. - 2012. - Vol. 189. - pp. 18-42. DOI: 10.1016/j.ins.2011.11.027.
6. Aliev R.A., Alizadeh A.V., Huseynov O.H. The arithmetic of discrete Z-numbers // Information Sciences. - 2015. - Vol. 290. - pp. 134-155. DOI: 10.1016/j.ins.2014.08.024.
7. Aliev R.A., Huseynov O.H., Zeinalova L.M. The arithmetic of continuous Z-numbers // Information Sciences. - 2016. - Vol. 373. - pp. 441-460. DOI: 10.1016/j.ins.2016.08.078.
8. Aliev R.A., Huseynov O.H., Serdaroglu R. Ranking of Z-numbers and its application in decision making // International Journal of Information Technology & Decision Making. - 2016. - Vol. 15, No. 6. - pp. 1503-1519. DOI: 10.1142/S0219622016500310.
9. Jang J.-S.R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. - 1993. - Vol. 23, No. 3. - pp. 665-685. DOI: 10.1109/21.256541.
10. Himeur Y., Ghanem K., Alsalemi A., Bensaali F., Amira A. Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives // Applied Energy. - 2021. - Vol. 287. - Article 116601. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116601.
11. Chou J.-S., Telaga A.S. Real-time detection of anomalous power consumption // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2014. - Vol. 33. - pp. 400-411. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.088.
12. Capozzoli A., Piscitelli M.S., Brandi S., Grassi D., Chicco G. Automated load pattern learning and anomaly detection for enhancing energy management in smart buildings // Energy. - 2018. - Vol. 157. - pp. 336-352. DOI: 10.1016/j.energy.2018.05.127.

FIVE-LEVEL RISK ASSESSMENT OF ENERGY CONSUMPTION ANOMALIES USING A Z-NUMBER-BASED SOFT COMPUTING MODEL

Tural Togrul SUFANZADE

Odlar Yurdu University, Baku, AZ1072, Azerbaijan

E-mail: sufanzade@gmail.com

Abstract: The article investigates the issue of five-level risk assessment of energy consumption anomalies using a Z-number-based soft computing model. In modern energy systems, sharp or gradual changes in consumption indicators may be associated with technical failures, inefficient usage, changes in production regimes, or external environmental factors. Therefore, it is important not only to detect anomalies in energy consumption but also to classify them correctly according to risk levels. The study substantiates the advantages of the Z-number approach, which supports decision-making under conditions of uncertainty and incomplete information. Since the Z-number model takes into account both the evaluation indicator and the reliability degree of that indicator, it enables a more realistic and flexible assessment of energy consumption risks. In the article, energy consumption anomalies are evaluated according to five risk levels: very low, low, medium, high, and very high. The proposed model, based on fuzzy logic, expert assessments, and soft computing principles, serves as a practical tool for early warning, monitoring, and planning preventive measures in energy management systems. The results of the study show that the Z-number-based approach can provide more effective results in processing uncertain data compared with classical statistical methods. In future studies, it is advisable to test the model on real energy consumption datasets and integrate it with artificial intelligence algorithms.

Keywords: Z-number, soft computing, energy consumption, anomaly, risk assessment, fuzzy logic.

ПЯТИУРОВНЕВАЯ ОЦЕНКА РИСКА АНОМАЛИЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ SOFT COMPUTING НА ОСНОВЕ Z-ЧИСЕЛ

Турал Тогрул СУФАНЗАДЕ

Odlar Yurdu University, Baku, AZ1072, Азербайджан

E-mail: sufanzade@gmail.com

Резюме: В статье исследуется вопрос пятиуровневой оценки риска аномалий энергопотребления с использованием модели soft computing на основе Z-чисел. В современных энергетических системах резкие или постепенные изменения показателей потребления могут быть связаны с техническими неисправностями, неэффективным использованием энергии, изменениями производственного режима или воздействием факторов внешней среды. Поэтому важное значение имеет не только выявление аномалий в энергопотреблении, но и их правильная классификация по уровням риска. В исследовании обосновываются преимущества подхода на основе Z-чисел, поддерживающего принятие решений в условиях неопределенности и неполной информации. Поскольку модель Z-чисел учитывает как оценочный показатель, так и степень достоверности данного показателя, она позволяет более реалистично и гибко определять риски энергопотребления. В статье аномалии энергопотребления оцениваются по пяти уровням риска: очень низкий, низкий, средний, высокий и очень высокий. Предлагаемая модель, основанная на нечеткой логике, экспертных оценках и принципах soft computing, выступает в качестве практического инструмента для раннего предупреждения, мониторинга и планирования профилактических мероприятий в системах управления энергопотреблением. Результаты исследования показывают, что подход на основе Z-чисел может обеспечивать более эффективные результаты при обработке неопределенных данных по сравнению с классическими статистическими методами. В дальнейших исследованиях целесообразно апробировать модель на реальных данных энергопотребления и интегрировать ее с алгоритмами искусственного интеллекта.

Ключевые слова: Z-число, soft computing, энергопотребление, аномалия, оценка риска, нечеткая логика