

БІОЛОГІЧНІ ТА МЕДИЧНІ ПРИЛАДИ І СИСТЕМИ

УДК 681.2.08 + 681.7

С. М. Злепко¹, Т. І. Козловська¹, В. А. Стасенко¹, В. С. Павлов¹,
В. П. Думенко²

ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФІЧНОГО ПРИЛАДУ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ПЕРИФЕРИЧНОГО КРОВООБІГУ

¹Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,

²Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського, м. Вінниця

Анотація: В роботі проведено оцінювання основних метрологічних характеристик фотоплетизмографічного приладу діагностування стану периферичного кровообігу. Побудовано його структурну схему, складено математичну модель фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, складено рівняння перетворення та отримано просторову функцію перетворення вимірювального каналу. Отримано формули для розрахунку таких метрологічних характеристик як чутливість, коефіцієнт впливу впливної величини, швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру, номінальну функцію перетворення, абсолютну мультиплікативну та абсолютну адитивну похибки і отримано їх графічні залежності.

Ключові слова: метрологічні характеристики, периферичний кровообіг, фотоплетизмографічний прилад.

Аннотация: В работе проведена оценка основных метрологических характеристик фотоплетизмографического прибора диагностики состояния периферического кровообращения. Построена его структурная схема, составлена математическая модель фотоприемника на основе пары фотодиод-операционный усилитель, составлено уравнение преобразования и получена пространственная функция преобразования измерительного канала. Получены формулы для расчета таких метрологических характеристик как чувствительность, коэффициент влияния влияющей величины, скорость изменения коэффициента влияющей величины по исходному параметру, номинальную функцию преобразования, абсолютную мультипликативную и абсолютную аддитивную погрешности и получены их графические зависимости.

Ключевые слова: метрологические характеристики, периферическое кровообращение, фотоплетизмографический прибор.

Abstract: The aim of the research - to assess the main metrological characteristics of photoplethysmographic device for peripheral circulation diagnostics. It's necessary for assessment the technical level of designed device. The block diagram is built and mathematical model of the photodetector based on a pair of photodiode-operational amplifier is composed. Transformation equation is composed and the spatial function of measuring channel conversion is obtained. The formulas for the calculation of the metrological characteristics such as sensitivity, influence influential factor values, speed values of the influential factor changes on the source parameter, the nominal conversion function, absolute multiplicative and absolute additive errors and their graphics are obtained.

Key words: metrological characteristics, peripheral circulation, photoplethysmographic device.

Вступ

Периферичним кровообігом називають рух крові в мілких артеріях, артеріолах, капілярах, венах та венах по принципу із крові в тканини, а потім з тканин в кров. В молодому віці проблеми порушення периферичного кровообігу зустрічаються не так часто, але з віком вони практично неминучі. Але в останні десятиріччя вік хворих з порушеннями периферичного кровообігу постійно зменшується [1].

Актуальність

Проведення якісного діагностування порушень периферичного кровообігу є важливою задачею сучасної медицини, оскільки вчасно проведене діагностування є запорукою успішного лікування. Сьогодні в медичну практику впроваджується велика кількість методів, які дозволяють ефективно визначати стан периферичного кровообігу людини. Одним із перспективних методів є метод фотоплетизмографії, який дозволяє визначити кровонаповнення і кровотік як в потужних венах і артеріях так і периферичних судинах і капілярах. Сучасні прилади, що базуються на застосуванні даного методу мають відносно невисоку достовірність діагностування та високу чутливість до артефактів. Прилади, які мають більш високі технічні показники, обмежуються в застосуванні через їх високу вартість та ряд протипоказань для хворого. Тому актуальним завданням є створення приладів з розширеними функціональними можливостями та високою достовірністю діагностування [1, 2].

Мета досліджень: підвищення достовірності прийняття рішень щодо дослідження стану периферичного кровообігу за допомогою фотоплетизмографічного приладу, шляхом розрахунку та оцінювання його основних метрологічних характеристик.

Задачі досліджень:

- побудувати структурну схему приладу діагностування периферичного кровообігу;
- скласти математичну модель фотоприймача приладу на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, на основі якої скласти рівняння перетворення та отримати просторову функцію перетворення вимірювального каналу;
- отримати формули для розрахунку таких метрологічних характеристик як чутливість, коефіцієнт впливу виливної величини, швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру, номінальну функцію перетворення, абсолютну мультиплікативну та абсолютну адитивну похибки і отримати їх графічні залежності.

Розв'язання задач

При розробленні нового приладу проводиться оцінювання його технічного рівня шляхом розрахунку метрологічних характеристик. Виходячи з режимів роботи засобів перетворення, розрізняють статичні і динамічні метрологічні характеристики [3, 4].

Розроблений прилад працює у статичному режимі, оскільки сигнал на його виході не змінюється протягом часу, достатнього для зчитування показів. До основних статичних метрологічних характеристик відносять: номінальну функцію перетворення; чутливість; похибку нелінійності; адитивну і мультиплікативні складові похибок [3]. Структурну схему розробленого фотоплетизмографічного приладу зображено на рисунку 1.

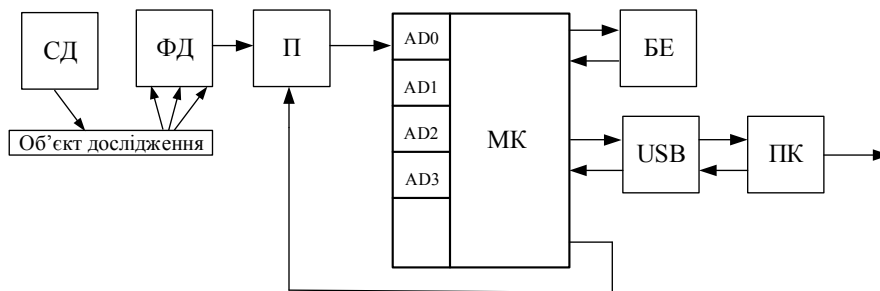


Рис. 1. Структурна схема розробленого приладу

На вхід вимірювального каналу (ВК) фотоплетизмографічного приладу діагностування стану периферичного кровообігу надходить світловий сигнал. Інформативним параметром ВК, структура якого містить фотоприймач, підсилювач та АЦП є сила світла I , що перетворюється в двійковий код N_x . В даній структурі в якості фотоприймача використовується пара фотодіод-операційний підсилювач.

Струм, що протікає через фотодіод, описується наступним виразом [4, 7]

$$I_{VD} = \frac{\Phi S_{IO}}{\sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})^2}} - I_S \left(\exp\left(\frac{e_e U_{VD}}{kT}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

де I_{VD} – струм фотодіода;

S_{IO} – інтегральна струмова чутливість фотодіода при немодульованому опроміненні;

Φ – падаючий на фотодіод потік опромінення;

I_S – темновий струм фотодіода;

U_{VD} – падіння напруги на фотодіоді;

T – абсолютна температура;

k – постійна Больцмана;

e_e – заряд електрона;

Ω – циклічна частота потоку опромінення;

τ_{VD} – постійна часу фотодіода, яка залежить від значень внутрішнього опору фотодіода R_{VD} , паразитної ємності фотодіода C_{VD} , часу розсмоктування неосновних носіїв заряду.

При використанні джерела світла з конденсорною лінзою, можна отримати плоско-паралельний потік опромінення, однаковий на всій площині. У цьому випадку потік опромінення та площа фоточутливого шару фотодіода, що опромінюється, пов'язані співвідношенням [5, 6]

$$\Phi_0 = J_p S = IS/r^2, \quad (2)$$

де J_p – інтенсивність променевого потоку,

r – відстань від джерела світла до поверхні, що освітлюється;

S – площа, що опромінюється;

I – сила світла.

На основі закону Ламберта втрати інтенсивності світла, що проходить крізь БТ, внаслідок розсіювання та поглинання описуються наступним співвідношенням (1, 2, 5)

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z), \quad (3)$$

де z – товщина БТ;

I_0 – інтенсивність падаючого світла;

μ_t – коефіцієнт послаблення оптичного випромінювання [5, 12]

$$\mu_t = \mu_s + \mu_a, \quad (4)$$

де μ_s – коефіцієнт розсіювання;

μ_a – коефіцієнт поглинання БТ.

Вихідна напруга фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач, з урахуванням зміщення нуля, різниці вхідних струмів, напруги шуму, описується виразом [5, 7]

$$U_\Phi = \frac{I_{VD} R_{33}}{1 + R_{33}/KR_{BX} + 1/K} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + U_{\text{ш}}, \quad (5)$$

де K – коефіцієнт передачі операційного підсилювача;

R_{BX} – вхідний опір операційного підсилювача;

U_{3M} – напруга зміщення нуля операційного підсилювача;

ΔI – різниця вхідних струмів операційного підсилювача;

$U_{\text{ш}}$ – напруга шуму на виході фотоприймача.

Модуль вихідної напруги визначається виразом [5, 7]

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{E_{\text{шш}}^2 + (I_{\text{шш}}^2 + I_{\text{шд}}^2 + I_{33}^2)R_{33}}, \quad (6)$$

де $E_{\text{шш}}$ – спектральна щільність напруги шуму операційного підсилювача;

$I_{\text{шш}}$ – спектральна щільність шумового струму операційного підсилювача;

$I_{\text{шд}}$ – спектральна щільність шумового струму опору зворотного зв'язку.

Щільність шумового струму фотодіода, що працює у фотовольтаїчному режимі [5, 6]

$$I_{\text{шд}} = \sqrt{4KT\Delta f/R_{VD}}, \quad (7)$$

де Δf – ефективна смуга пропускання електронного тракту.

Щільність шумового струму опору зворотного зв'язку [5, 6]

$$I_{33} = \sqrt{4KT\Delta f / R_{33}}. \quad (8)$$

В загальному випадку, вхідний опір та опір зворотного зв'язку має реактивний характер. Тому у комплексній формі, вираз (5) записується як

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\Phi} &= \frac{\dot{I}_{VD}\dot{Z}_{33}}{1 + \dot{Z}_{33}/K\dot{Z}_{BX} + 1/\dot{K}} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{III} = \\ &= \frac{\dot{I}_{VD}\dot{Z}_{33}\dot{Z}_{BX}\dot{K}}{\dot{Z}_{BX}\dot{K} + \dot{Z}_{BX} + \dot{Z}_{33}} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{III}, \end{aligned} \quad (9)$$

де \dot{U}_{Φ} – комплексна амплітуда вихідної напруги фотоприймача;

\dot{U}_{III} – комплексна шумова напруга;

\dot{K} – комплексний коефіцієнт передачі операційного підсилювача;

\dot{Z}_{33} , \dot{Z}_{BX} – відповідно комплексний опір в колі зворотного зв'язку та комплексний вхідний опір операційного підсилювача.

Опори \dot{Z}_{33} , \dot{Z}_{BX} визначаються виразами

$$\dot{Z}_{33} = R_{33} / (1 + j\Omega R_{33} C_{33}), \quad (10)$$

де C_{33} – паразитна ємність кола зворотного зв'язку.

$$\dot{Z}_{BX} = R_{BX} / (1 + j\Omega R_{BX} C_{BX}), \quad (11)$$

де C_{BX} – вхідна ємність операційного підсилювача.

Комплексний коефіцієнт передачі операційного підсилювача без зворотного зв'язку визначається як [5]

$$\dot{K} = K_0 / (1 + j\Omega / \Omega_{GP}), \quad (12)$$

де K_0 – коефіцієнт передачі операційного підсилювача на нульовій частоті;

Ω_{GP} – гранична частота операційного підсилювача.

Еквівалентний опір навантаження фотодіода визначається виразом

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{BH} &= \dot{Z}_{33} / (1 + \dot{K} + \dot{Z}_{33} / \dot{Z}_{BX}) = \\ &= R_{33} / (1 + j\Omega R_{33} C_{33}) \left(1 + K_0 / (1 + j\Omega / \Omega_{GP}) + \frac{R_{33}}{R_{BX}} \cdot \frac{R_{BX} / (1 + j\Omega R_{BX} C_{BX})}{(1 + j\Omega R_{33} C_{33})} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Отже, падіння напруги на фотодіоді

$$\dot{U}_{VD} = \dot{I}_{VD}\dot{Z}_{EH} = \frac{I}{r^2} \cdot \frac{S_{IO}}{1 + j\Omega\tau_{VD}} \dot{Z}_{EH}\dot{S} - \dot{Z}_{EH}I_S (\exp(e\dot{U}_{VD}/kT) - 1), \quad (14)$$

де \dot{S} – комплексна амплітуда площі фоточутливого шару, що освітлюється.

Оскільки фотодіод працює у фотовольтаїчному режимі, падіння напруги на ньому мале та складає одиниці мВ. Відоме співвідношення $\exp(x) \approx 1 + x$, $x \rightarrow 0$ дає змогу спростити вираз (14)

$$\dot{U}_{VD} = \dot{I}_{VD} \dot{Z}_{EH} = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} \cdot S_{I0} \dot{Z}_{EH} \dot{S} / (1 + j\Omega\tau_{VD}) - \dot{Z}_{EH} I_S e_e \dot{U}_{VD} / kT. \quad (15)$$

Провівши нескладні перетворення, отримуємо вираз, який визначає падіння напруги на фотодіоді

$$\dot{U} = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} \frac{S_{I0}}{1 + j\Omega\tau_{VD}} \dot{Z}_{EH} \dot{S} / \left(I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right). \quad (16)$$

Підставивши (6), (1), (4), (10), (11), (12), (16) у (9) та скориставшись співвідношенням $\exp(x) \approx 1 + x$, $x \rightarrow 0$ отримуємо вираз, що зв'яже комплексну амплітуду вихідної напруги фотоприймача з комплексною амплітудою площі освітлюваного фоточутливого шару фотодіода [5].

$$\dot{U}_\Phi = \frac{\left(K_0 R_{BX} R_{33} \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} S_{I0} - I_S e_e \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z)}{r^2} S_{I0} \dot{Z}_{EH} / kT \left(I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right) \right) \dot{S}}{(1 + j\Omega\tau_{VD}) \left(R_{33} + R_{BX}(K_0 + 1) - \frac{\Omega^2}{\Omega_{ГР}} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left(\frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{ГР}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33}(K_0 + 1)) \right) \right)} + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{III}. \quad (17)$$

Вираз (17) є математичною моделлю фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач. При умовах $U_\Phi \gg U_{3M}$ та $I_{VD} \gg \Delta I$, значеннями U_{3M} та ΔI можна знехтувати. При використанні елементної бази з низьким рівнем шумів, шумовою складовою виразу (17) можна знехтувати. Внаслідок малого значення падіння напруги на фотодіоді при його роботі у фотовольтаїчному режимі та малого значення темного струму, друга складова чисельника виразу (17) близька до нуля. З урахуванням цих умов вираз (17) матиме вигляд [5]

$$\dot{U}_\Phi = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{I0} K_0 R_{BX} R_{33} \dot{S} / r^2 \cdot (1 + j\Omega\tau_{VD}) \dot{S}}{K_0 R_{BX} + R_{33} + R_{BX} - \Omega^2 R_{BX} R_{33} \frac{(C_{BX} - C_{33})}{\Omega_{ГР}} + j\Omega \left(\frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{ГР}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33}(K_0 + 1)) \right)}. \quad (18)$$

Із (18) випливає, що при виконанні вищенаведених умов, вихідна напруга фотоприймача прямо пропорційна площі освітлюваного фоточутливого шару фотодіода. Якщо розглядати фотоприймач на основі пари фотодіод-операційний підсилювач як перетворювач площі освітлюваного шару фотодіода у напругу, доцільно ввести поняття коефіцієнту перетворення, який дорівнює відношенню комплексної амплітуди вихідної напруги до комплексної амплітуди освітлюваної площі, без урахування шумової напруги, напруги зміщення та різниці вхідних струмів операційного підсилювача, темного струму фотодіода

$$\begin{aligned} \dot{K}_S(\Omega) &= \frac{\dot{U}_\Phi}{\dot{S}} = \\ &= \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot K_0 R_{BX} R_{33} S_{I0} / r^2 (1 + j\Omega\tau_{VD})}{K_0 R_{BX} + R_{33} + R_{BX} - \frac{\Omega^2}{\Omega_{ГР}} R_{BX} R_{33} (C_{BX} - C_{33}) + j\Omega \left(\frac{R_{33} + R_{BX}}{\Omega_{ГР}} + R_{BX} R_{33} (C_{BX} + C_{33}(K_0 + 1)) \right)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Через коефіцієнт перетворення площі в напругу вираз (19) запишеться як

$$\dot{U}_\Phi = \dot{K}_S(\Omega) \dot{S} \left(1 - I_S e_e \dot{Z}_{EH} / K_0 R_{BX} R_{33} kT \left(I_S \frac{e_e}{kT} \dot{Z}_{EH} - 1 \right) \right) + \Delta I \cdot R_{33} + U_{3M} + \dot{U}_{III}. \quad (20)$$

В більшості випадків гранична частота фотодіода значно менша за граничну частоту операційного підсилювача. Тому спад частотної характеристики в області верхніх частот визначається частотними властивостями фотодіода. Вхідний опір сучасних операційних підсилювачів складає десятки МОм, що значно перевищує опір в колі зворотного зв'язку та внутрішній опір фотодіода. Тому можна прийняти $R_{BX} = \infty$. З урахуванням усіх вищенаведених умов, вираз (20) матиме вигляд [5]

$$K_S = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10} R_{33} / r^2 \sqrt{1 + (\Omega \tau_{VD})^2}. \quad (21)$$

При умові, що частота опромінення значно менша за граничну частоту фотодіода, його частотними властивостями можна знехтувати, вираз (21) матиме вигляд

$$K_S = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10} R_{33} / r^2. \quad (22)$$

А вираз для вихідної напруги фотоприймача в залежності від площі освітлюваного фоточутливого шару фотодіода

$$U_\Phi = I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10} R_{33} S / r^2. \quad (23)$$

Вираз (23) є максимально спрощеною математичною моделлю фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач як перетворювача площі в напругу, яку можна використовувати при умові того, що ширина спектру опромінення значно менша граничної частоти фотодіода.

З урахуванням формули (23) рівняння перетворення ВК матиме вигляд

$$N_x = \frac{I_0 \cdot \exp(-\mu_t \cdot z) \cdot S_{10} R_{33} S / r^2 \cdot K}{U_{опорн.}} \cdot 2^n, \quad (24)$$

де K – коефіцієнт підсилення ОП;

$U_{опорн.}$ – опорна напруга АЦП;

n – розрядність АЦП.

Статична характеристика ВК (функція перетворення) представлена на рис.2.

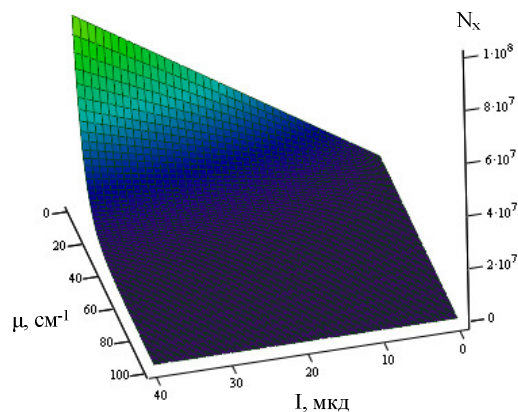


Рисунок 2 – Просторова функція перетворення ВК

Як видно з рис. 2, отримане рівняння перетворення має нелінійний характер. Функція перетворення ВК є вихідною при отриманні аналітичних залежностей для оцінювання таких статичних метрологічних характеристик як номінальна функція, функція перетворення, чутливість, похибка нелінійності, адитивна і мультиплікативна складові похибки.

Номінальний коефіцієнт перетворення або чутливість в діапазоні зміни вимірювального параметру [3, 5]

$$S_I = \frac{\partial N_x}{\partial I} = \frac{e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (25)$$

Зміна чутливості в діапазоні перетворення інформативного параметру I дорівнює [5]

$$S_I' = \frac{\partial^2 N_x}{2 \cdot \partial I^2} = 0; \quad S_I'' = \frac{\partial^3 N_x}{6 \cdot \partial I^3} = 0. \quad (26)$$

Коефіцієнт впливу впливної величини μ на вихідний параметр N_x дорівнює

$$\beta = \frac{\partial N_x}{\partial \mu} = - \frac{I \cdot z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (27)$$

Швидкість зміни коефіцієнта впливу на вихідний сигнал

$$P(\beta) = \frac{\partial^2 N_x}{2 \cdot \partial \mu^2} = \frac{I \cdot z^2 \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (28)$$

Коефіцієнт сумісного впливу інформативного параметру I та впливної величини μ на номінальну чутливість S_I визначається

$$\alpha = \frac{\partial^2 N_x}{\partial I \partial \mu} = - \frac{z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (29)$$

Номінальна функція перетворення

$$N_H = S_I \cdot I + S_I' \cdot I^2 + S_I'' \cdot I^3 = \frac{I \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (30)$$

Абсолютна похибка ΔN_H нелінійності номінальної функції вимірювального перетворення дорівнює

$$\Delta N_H = S_I' \cdot (I - I_H)^2 + S_I'' \cdot (I - I_H)^3 = 0. \quad (31)$$

Відносна похибка δ_H нелінійності номінальної функції вимірювального перетворення

$$\delta_H = \frac{\Delta N_H}{S_I \cdot (I - I_H)}, \quad (32)$$

звідки $\delta_H = 0$.

Абсолютна мультиплікативна похибка перетворення

$$\Delta N_M = \alpha \cdot I \cdot \Delta \mu = - \frac{I \cdot \Delta \mu \cdot z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}}. \quad (33)$$

Абсолютна адитивна похибка перетворення

$$\Delta N_a = \beta \cdot (\mu - \mu_n) + \beta' \cdot (\mu - \mu_n)^2 = -\frac{I \cdot (\mu - \mu_n) \cdot z \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}} + \frac{I \cdot (\mu - \mu_n)^2 \cdot z^2 \cdot e^{-\mu \cdot z} \cdot S_{IO} \cdot R_{33} \cdot S \cdot 2^n \cdot K}{r^2 \cdot U_{ref}} \quad (34)$$

Отримані результати аналітичних залежностей (25 – 34) основних статичних метрологічних характеристик ВК наведені на рис. 3 – 9 [7]

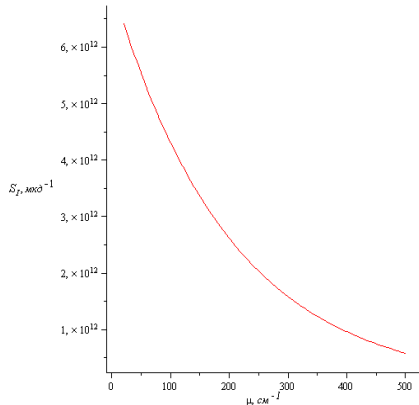


Рисунок 3 – Чутливість в діапазоні зміни інформативного параметру

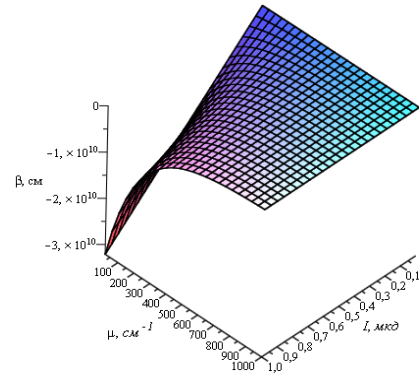


Рисунок 4 – Коефіцієнт впливу впливної величини

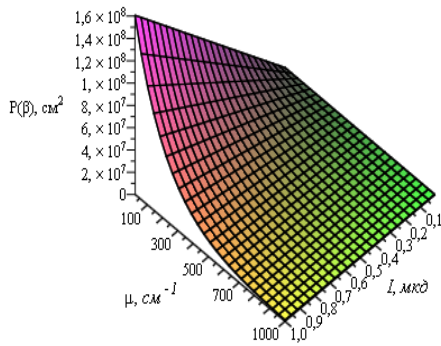


Рисунок 5 – Швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру

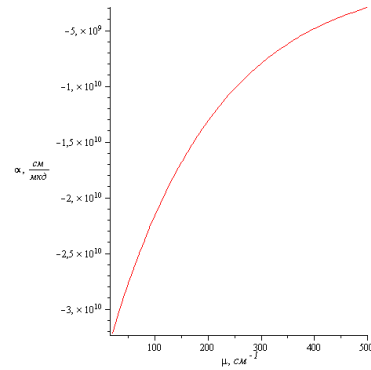


Рисунок 6 – Коефіцієнт сумісного впливу коефіцієнта послаблення і впливної величини на номінальну чутливість

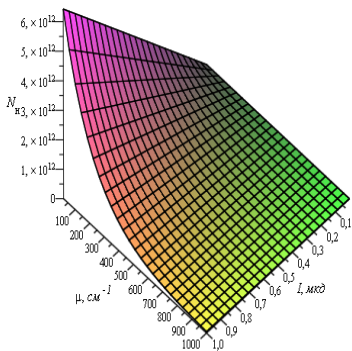


Рисунок 7 – Номінальна функція перетворення

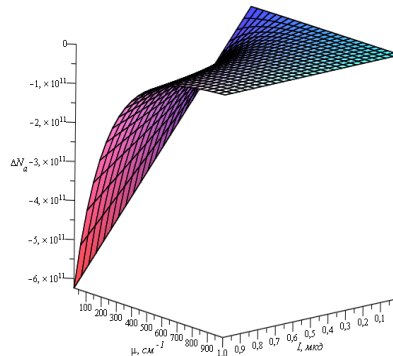


Рисунок 8 – Абсолютна мультиплікативна похибка

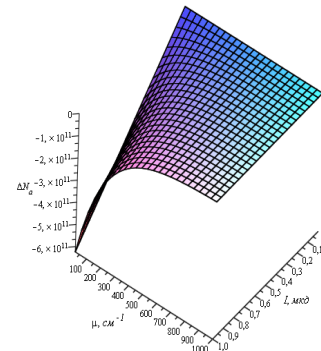


Рисунок 9 – Абсолютна адитивна похибка

Висновки

В статті було проведено оцінювання основних метрологічних характеристик фотоплетизмографічного приладу діагностування стану периферичного кровообігу.

1. Отримано рівняння перетворення вимірювального каналу, побудовано структурну схему приладу та складено математичну модель фотоприймача на основі пари фотодіод-операційний підсилювач.

2. Складено рівняння перетворення і отримано просторову функцію перетворення вимірювального каналу.

3. Отримано формули для розрахунку таких метрологічних характеристик як чутливість, коефіцієнт впливу виливної величини, швидкість зміни коефіцієнта впливної величини по вихідному параметру, номінальна функція перетворення, абсолютна мультиплікативна та абсолютна адитивна похибки і отримано їх графічні залежності.

Список літератури

1. Оптико-електронні засоби діагностування периферичного кровообігу з підвищеною достовірністю / [Павлов С. В., Козловська Т. І., Василенко В. Б.] – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 140 с.

2. Фізичні основи біомедичної оптики / [Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Колісник П. Ф. Козловська Т. І., Думенко В. П.] – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 155 с.

3. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: навч. посіб. / [С. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк] – Вінниця: Велес, 2011. – 219 с. – ISBN 966-7993-18-3.

4. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. пос. / Кухарчук В.В., Кучерук В. Ю., Долгополов В. П., Грумінська Л. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 252 с.

5. Васілевський О. М. Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів / О. М. Васілевський, П. І. Кулаков. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 176 с. – ISBN 978-966-641-420-8.

6. Источники и приемники излучения: учебн. пос. для студ. оптич. спец. вузов / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г. В. Польщиков – СПб. : Политехника, 1991. – 240 с. – ISBN 5-7325-0164-9.

7. Поджаренко В. О. Оцінка статичних метрологічних характеристик вимірювальних каналів вібрації / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський, В. М. Севастьянов // Український метрологічний журнал. – Х. – 2005. – №1. – С. 21-27.

Відомості про авторів

Злепко Сергій Макарович – д.т.н., професор, завідувач кафедри проектування медико-біологічної апаратури, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

Козловська Тетяна Іванівна – к.т.н., старший викладач кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

Стасенко Владислав Антонович – к.ф.-м.н., доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

Павлов Володимир Сергійович – студент групи О-15, факультету комп'ютерних систем та автоматики, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця.

Думенко Вікторія Петрівна – к.т.н., старший викладач кафедри загальної фізики, Вінницький державний педагогічний університет ім. М. Коцюбинського, Острозького, 32, м. Вінниця.

УДК 004.41:616.12-073.96/97

Н. С. Луцик, Я. В. Литвиненко, С. А. Лупенко, А. М. Зозуля

ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ТА АНАЛІЗУ СЕРЦЕВОГО РИТМУ З ПІДВИЩЕНОЮ ІНФОРМАТИВНІСТЮ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль

Анотація. У даній роботі удосконалено програмний комплекс аналізу кардіосигналів, шляхом доповнення його новими програмними модулями, що реалізують нові методи аналізу серцевого ритму та морфологічного аналізу кардіосигналів. За рахунок використання нової математичної моделі сигналів серця у вигляді умовного циклічного випадкового процесу та нових методів його опрацювання, комплекс дає змогу проводити автоматизований статистичний морфологічний аналіз та аналіз ритму кардіосигналів із підвищеною інформативністю, що уможливило підвищення точності та достовірності діагностики стану серцево-судинної системи організму людини. Удосконалений програмний комплекс може бути використаний як складова частина програмного забезпечення автоматизованої діагностичної системи для комплексного морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму на ЕОМ.

Ключові слова: програмний комплекс, математична модель, серцевий ритм, сигнали серця.

Аннотация. В данной работе усовершенствовано программный комплекс анализа кардиосигналов, путем дополнения его новыми программными модулями, реализующими новые методы анализа сердечного ритма и морфологического анализа кардиосигналов. За счет использования новой математической модели сигналов сердца в виде условного циклического случайного процесса и новых методов его обработки, комплекс позволяет проводить автоматизированный статистический морфологический анализ и анализ ритма кардиосигналов с повышенной информативностью, что позволило повышения точности и достоверности диагностики состояния сердечно-сосудистой системы организма человека. Усовершенствованный программный комплекс может быть использован как составная часть программного обеспечения автоматизированной диагностической системы для комплексного морфологического анализа и анализа сердечного ритма на ЭВМ.

Ключевые слова: программный комплекс, математическая модель, сердечный ритм, сигналы сердца.

Abstract. In the present study, the existing software for the analysis of cardiosignals was improved. There were implemented the new methods of the analysis of heart rhythm and morphological analysis of cardiosignals. For this purpose, the mathematical model of cardiosignals in the form of conditional random cyclic process was used, as well as the methods of its processing, proposed by the authors. The present software allows to perform the automated statistical morphological analysis and the analysis of the cardiorythm with increased informativeness. The accuracy and reliability of the diagnosis of the cardiovascular system state of the human body were increased. These improved software can be used as a part of the automated diagnostic system of the heart rhythm analysis.

Key words: software, mathematical model, heart rhythm, cardiac signals.

Вступ

На сьогоднішній день захворювання серцево-судинної системи людини посідають перше місце у світі за поширеністю та спричиняють понад половину всіх випадків смерті. Тому, розробка високоінформативних комп'ютерних систем автоматизованої діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини за зареєстрованими кардіосигналами, є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої, сприятиме підвищенню якості та ефективності медичного обслуговування населення, а також суттєво зменшить обсяг рутинних робіт лікаря-кардіолога.

У роботах [1, 2], на основі теорії циклічних випадкових процесів, обґрунтовано нові математичні моделі та методи опрацювання широкого класу сигналів серця електричної, магнітної та акустичної природи, що дало змогу підвищити точність та достовірність медичної діагностики функціонального стану серця та серцево-судинної системи людини. У роботі [3], розроблено програмний комплекс для моделювання та аналізу кардіосигналів, який втілює відповідні нові моделі та методи їх опрацювання.

Актуальність

Розробці математичних моделей та методам обробки циклічних сигналів серця в комп'ютерних кардіодіагностичних системах присвячена значна кількість наукових праць [4-7].

Удосконаленим підходом до моделювання та аналізу кардіосигналів є підхід із використанням умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму [8], що дало змогу підвищити інформативність аналізу кардіосигналів завдяки врахування їх подвійної стохастичності - стохастичності ритму та стохастичності морфологічної структури кардіосигналів.

Дану роботу присвячено удосконаленню програмного комплексу, де на відміну від попередньої розробки, у комплекс імплементовано новий підхід до моделювання та опрацювання кардіосигналів на базі умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму, що дає змогу отримувати повнішу діагностичну інформацію про стан серцево-судинної системи людини.

Мета

Мета роботи полягає в удосконаленні програмного комплексу для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму, шляхом доповнення його новими програмними модулями, що реалізують нові методи аналізу серцевого ритму та морфологічного аналізу, які ґрунтуються на використанні нової математичної моделі сигналів серця, у вигляді умовного циклічного випадкового процесу [8].

Задачі

1. Обґрунтувати математичний апарат програмного комплексу для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю.

Модернізувати структурно-функціональну схему програмного комплексу та удосконалити програмний комплекс для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю з використанням середовища Delphi 7.

2. Провести апробацію програмного комплексу на реальних статистичних даних.

Розв'язання задач

Наведемо основні математичні залежності, які лежать в основі математичного забезпечення удосконаленого програмного комплексу. Загалом, програмний комплекс дає змогу здійснювати морфологічний аналіз кардіосигналів та аналіз їх ритму. Морфологічний аналіз полягає в статистичному оцінюванні ймовірнісних характеристик (математичного сподівання, дисперсії, моментних функцій вищого порядку, змішаних моментних функцій) кардіосигналу на основі таких статистик.

Реалізація оцінки математичного сподівання кардіосигналу визначалася за формулою [2]:

$$\hat{m}_\xi(t) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \xi_\omega(t + T(t,1)), t \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), \quad (1)$$

де M - кількість циклів процесу, $\xi_\omega(t)$ - зареєстрована реалізація кардіосигналу, $T(t,1)$ - дискретна функція ритму кардіосигналу, \mathbf{W}_1 - область визначення першого кардіоциклу.

Реалізація оцінки дисперсії кардіосигналу визначалась так:

$$\hat{d}_\xi(t) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} [\xi_\omega(t + T(t,1)) - \hat{m}_\xi(t + T(t,1))]^2, t \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2). \quad (2)$$

Використовуючи формули (1), (2), проведено статистичну обробку ЕКС результати якої подано на рис. 5. Автокореляційна функція в межах циклу, автокореляційна функція за межами циклу та коваріаційна функції обчислювали згідно виразів (3-5):

$$\begin{aligned} \hat{R}_\xi(t_1, t_2) &= \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} (\xi_\omega(t_1 + T(t_1,1)) - \hat{m}_\xi(t_1 + T(t_1,1))) \cdot \\ &\cdot (\xi_\omega(t_2 + T(t_2,1)) - \hat{m}_\xi(t_2 + T(t_2,1))), t_1, t_2 \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tilde{R}_\xi(t_1, t_2) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} (\xi_\omega(t_1 + T(t_1,1)) - \hat{m}_\xi(t_1 + T(t_1,1))) \cdot (\xi_\omega(t_2 + T(t_2,1)) - \hat{m}_\xi(t_2 + T(t_2,1))),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), t_2 \in \mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^{M-1} \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_i = [T_i, T_{i+1}), \quad (4)$$

$$\hat{C}_\xi(t_1, t_2) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} (\xi_\omega(t_1 + T(t_1,1))) \cdot (\xi_\omega(t_2 + T(t_2,1))),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), t_2 \in \mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^{M-1} \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_i = [T_i, T_{i+1}). \quad (5)$$

На відміну від відомого аналога програмного комплексу в удосконаленому програмному комплексі є можливість оцінити змішані моментні функції при зміні їх аргументів не лише в межах тривалості одного кардіосигналу, а і за межами циклу, що надає додаткову інформацію про стан серцево-судинної системи.

Математичний апарат для аналізу серцевого ритму із підвищеною інформативністю ґрунтується на статистичному оцінюванні ймовірнісних характеристик випадкової функції ритму кардіосигналу. Використані методи аналізу забезпечують зростання «роздільної здатності», інформативності аналізу серцевого ритму за рахунок статистичного аналізу не лише R-R-інтервалів, що задають тривалість серцевих циклів, а шляхом виявлення статистичних закономірностей для більшої кількості часових інтервалів, що розділяють однофазні відліки електрокардіограми. Наприклад, такими однофазними відліками електрокардіограми можуть бути початки P-зубців, Q-зубців, R-зубців, S-зубців, T-зубців, U-зубців. Тобто, об'єктом статистичного аналізу ритму є множина послідовностей часових інтервалів між однофазними відліками електрокардіограми, а саме, послідовності $TT(t_{T,n})$, $PP(t_{P,n})$, $QQ(t_{Q,n})$, $RR(t_{R,n})$, $SS(t_{S,n})$, що формуються згідно формул:

$$\begin{aligned} PP(t_{P,n}) &= P(t_{P,n}) - P(t_{P,n-1}); \\ QQ(t_{Q,n}) &= Q(t_{Q,n}) - Q(t_{Q,n-1}); \\ RR(t_{R,n}) &= R(t_{R,n}) - R(t_{R,n-1}); \\ SS(t_{S,n}) &= S(t_{S,n}) - S(t_{S,n-1}); \\ TT(t_{T,n}) &= T(t_{T,n}) - T(t_{T,n-1}); \\ UU(t_{U,n}) &= U(t_{U,n}) - U(t_{U,n-1}); \quad n = \overline{2, N}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $P(t_{P,n})$, $Q(t_{Q,n})$, $R(t_{R,n})$, $S(t_{S,n})$, $T(t_{T,n})$, $U(t_{U,n})$ – моменти часу початку відповідно P-зубців, Q-зубців, R-зубців, S-зубців, T-зубців, U-зубців, а n – номер серцевого циклу.

За такого підходу, формується більш інформативна ніж кардіоінтервалограма дискретна функція, яка враховує інформацію не лише про RR інтервали але й PP, TT, QQ, RR, SS інтервали. Вона теоретично може бути як завгодно щільною і перейти (трансформуватися) у функцію дійсного аргументу $T(t, n)$, $t \in R$. Цю функцію називають функцією ритму умовного циклічного випадкового процесу [1].

Вище описані методи статистичного оцінювання були втілені у програмний комплекс для морфоаналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю, який складається з двох основних блоків:

1. Блок статистичної обробки кардіосигналів: статистичний морфологічний аналіз кардіосигналів та статистичний аналіз серцевого ритму з підвищеною інформативністю.
2. Блок статистичної обробки зареєстрованих кардіосигналів для задач визначення автокореляційної та коваріаційної функцій в межах циклу та поза межами циклу.

Структурна схема удосконаленого програмного комплексу представлена на рис. 1. Програмний комплекс написаний на мові програмування Delphi 7.

Процедура обробки досліджуваного ЕКС включає інтерполяцію функції ритму, інтерполяцію сигналу, передискретизацію функції ритму, передискретизації сигналу, оцінювання математичного сподівання та дисперсії. Вхідними даними при такій обробці є значення сигналу; дискретна функція ритму; кількість циклів, з яких складається сигнал; кількість зон, з яких складається кожен цикл. Дана частина статистичної обробки передбачає передискретизацію функції ритму та передискретизацію сигналу, тому необхідно задати крок передискретизації, який на порядок менший від кроку дискретизації досліджуваного сигналу.

Вказана схема працює наступним чином. Спочатку завантажуються вхідні дані кардіосигналу та функції ритму. Для контролю вводу правильних даних в комплексі передбачена можливість візуалізації введених даних.

Як приклад, на рис. 2 поданий загальний вигляд інтерфейсу програми для введення даних сигналу та функції ритму, на рис. 3 поданий загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації даних.

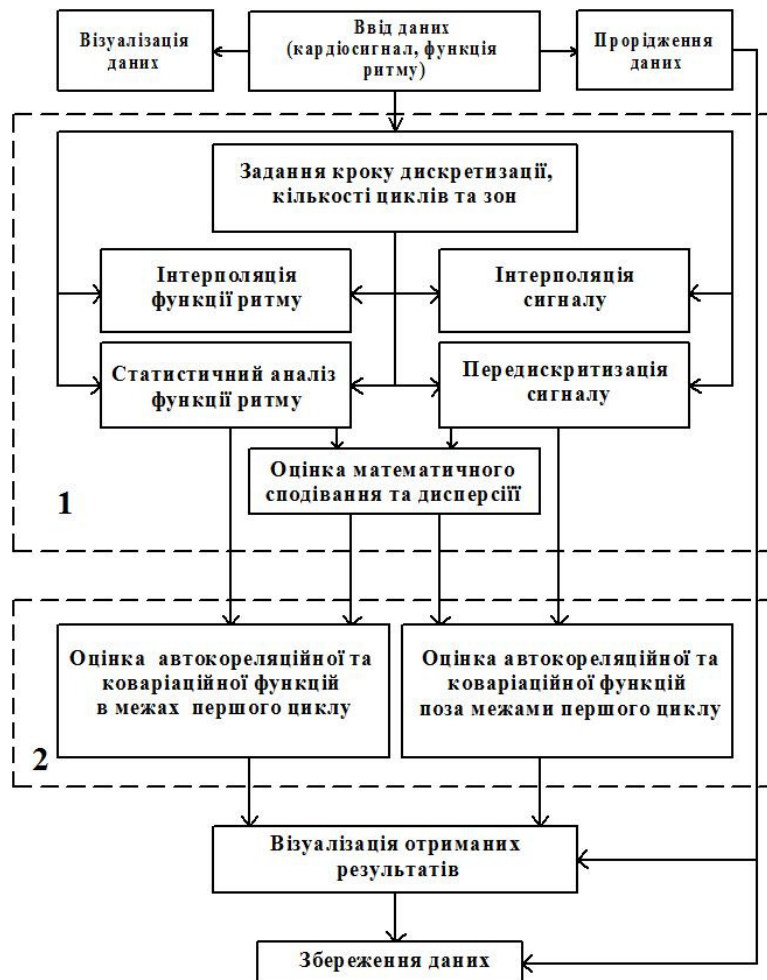


Рисунок 1 – Структурно-функціональна схема програмного комплексу для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю

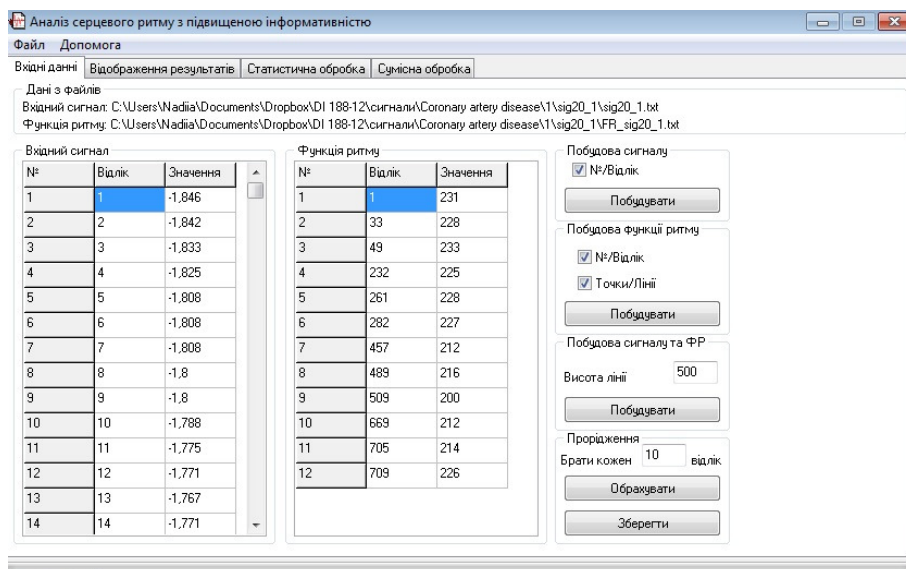


Рисунок 2 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для введення даних сигналу та функції ритму

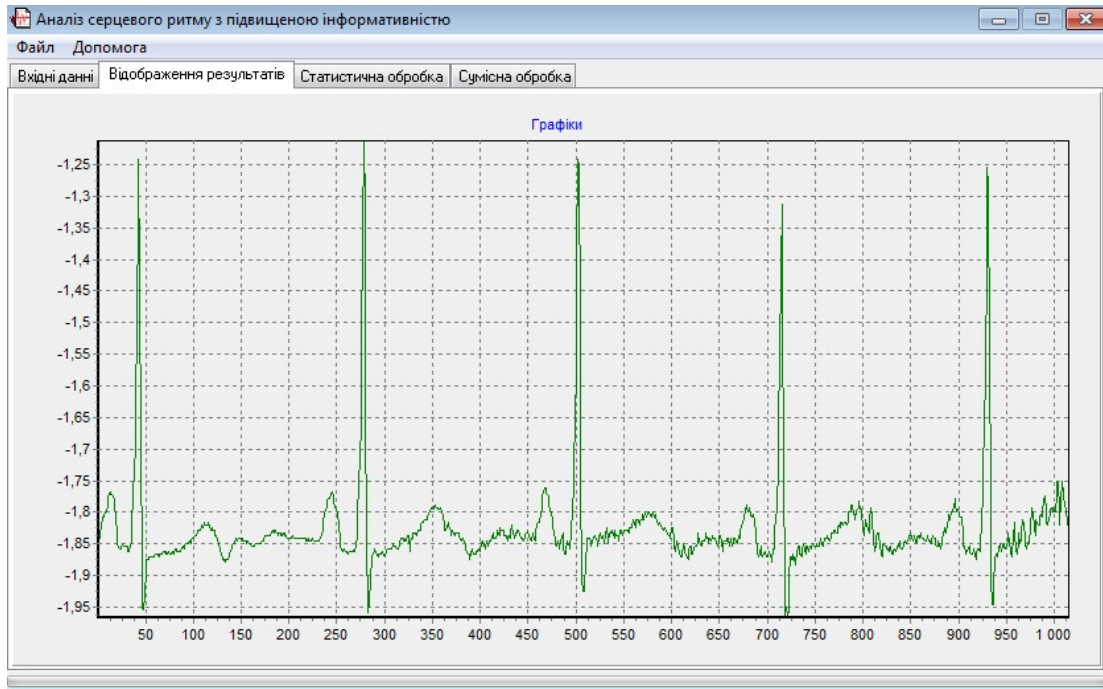


Рисунок 3 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації даних

Результати послідовних кроків обробки з врахуванням дискретної функції ритму подано на рис. 4.

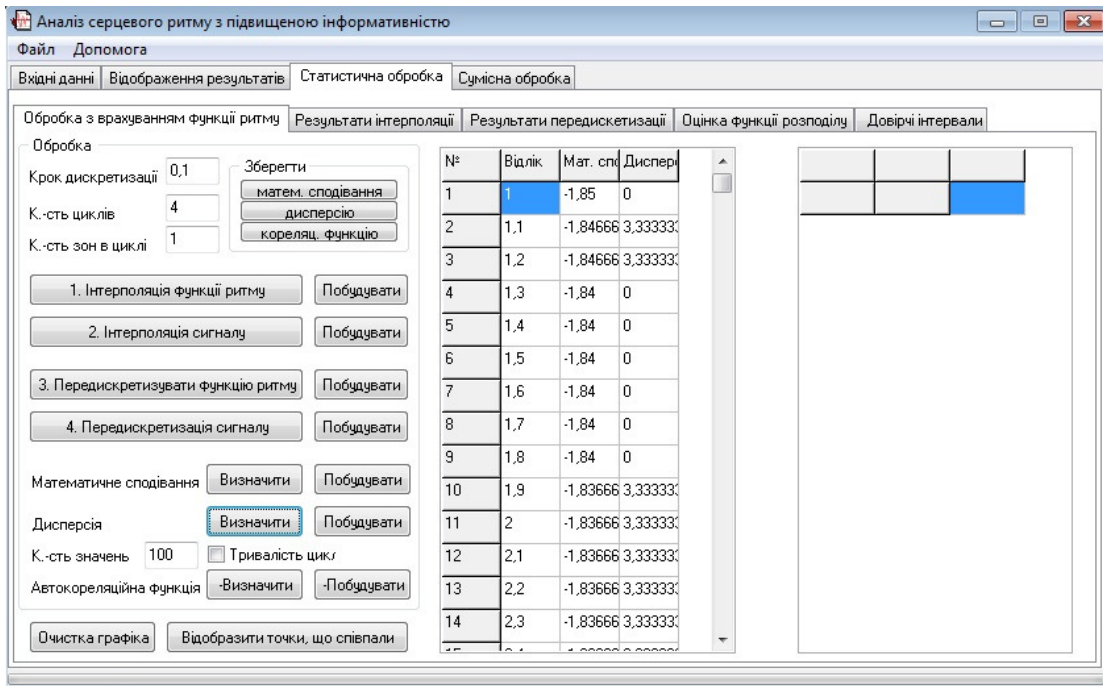


Рисунок 4 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для проведення статистичної обробки з врахуванням функції ритму

Приклад отриманих статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії подано на рис. 5.

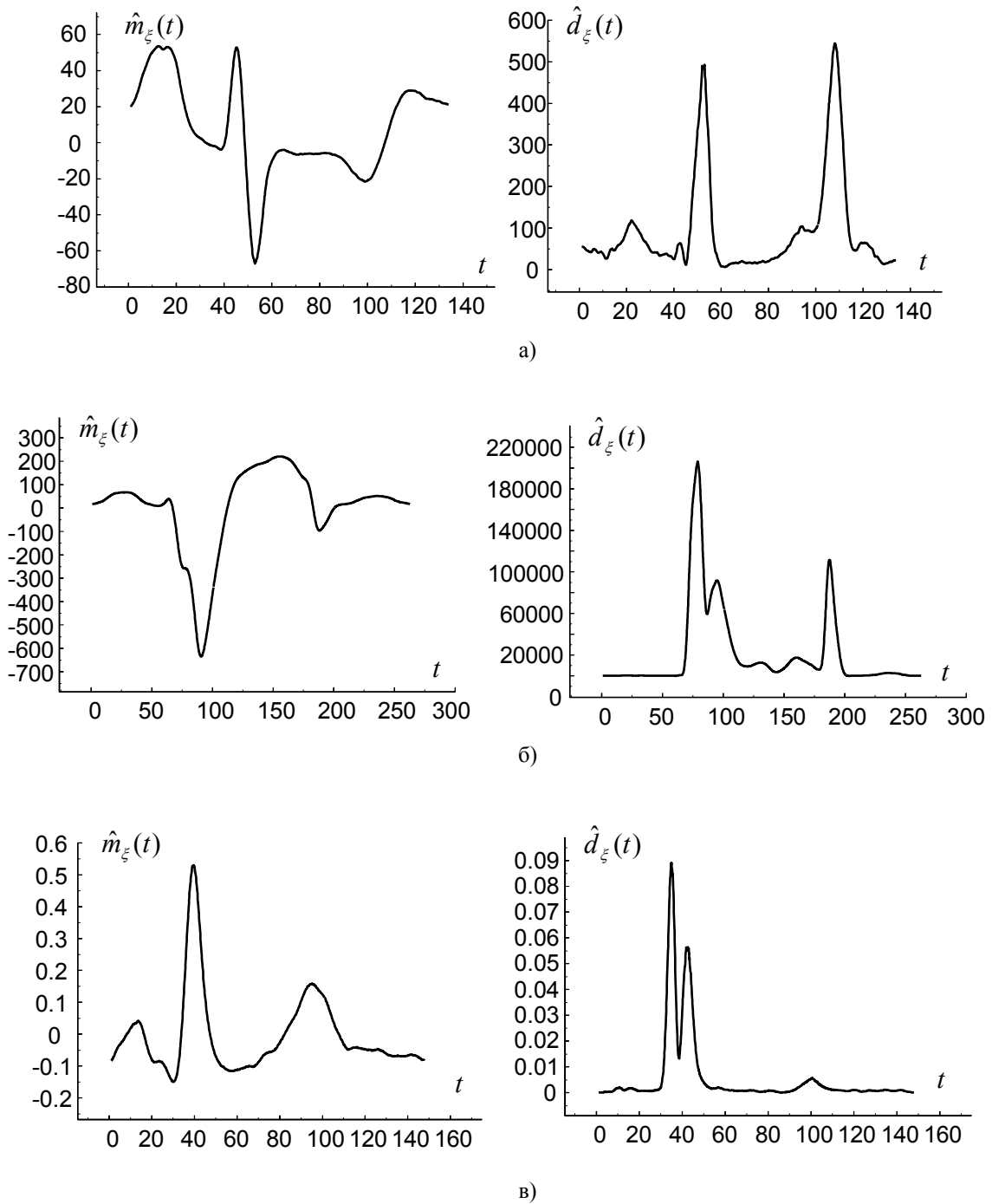


Рисунок 5 – Результати статистичної обробки ЕКС

- а) оцінка математичного сподівання та дисперсії ЕКС з порушеннями морфологічного характеру;
- б) оцінка математичного сподівання та дисперсії ЕКС з порушеним серцевим ритмом;
- в) оцінка математичного сподівання та дисперсії ЕКС умовно здорової людини.

Інтерфейс програмного комплексу для визначення автокореляційної та коваріаційної функцій в межах циклу та поза межами циклу показано на рис. 6.

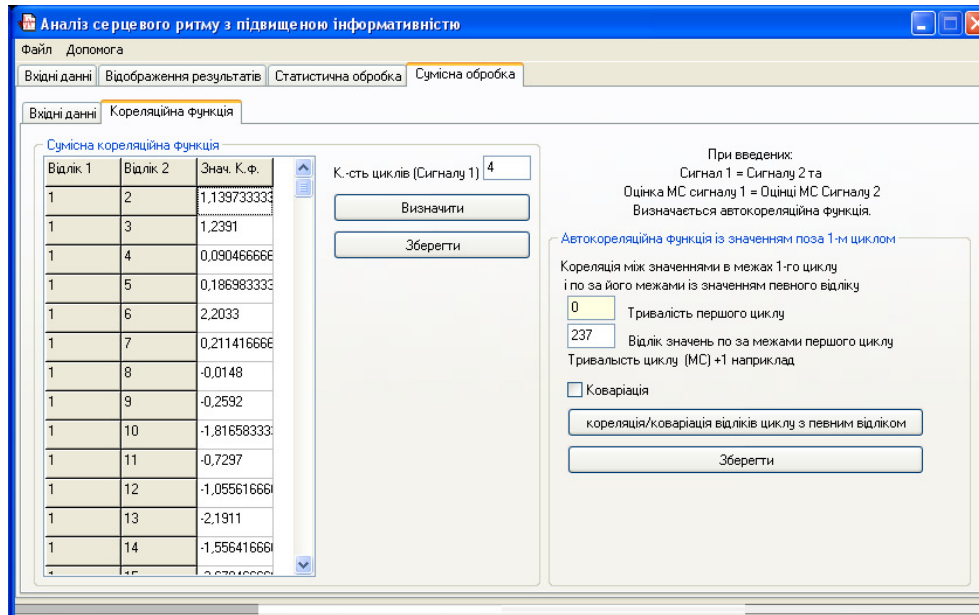


Рисунок 6 – Визначення автокореляційної та коваріаційної функцій

Приклад отриманих статистичних оцінок автокореляційної функції в межах першого циклу та автокореляційної функції поза межами першого циклу подано на рис. 7 та рис. 8.

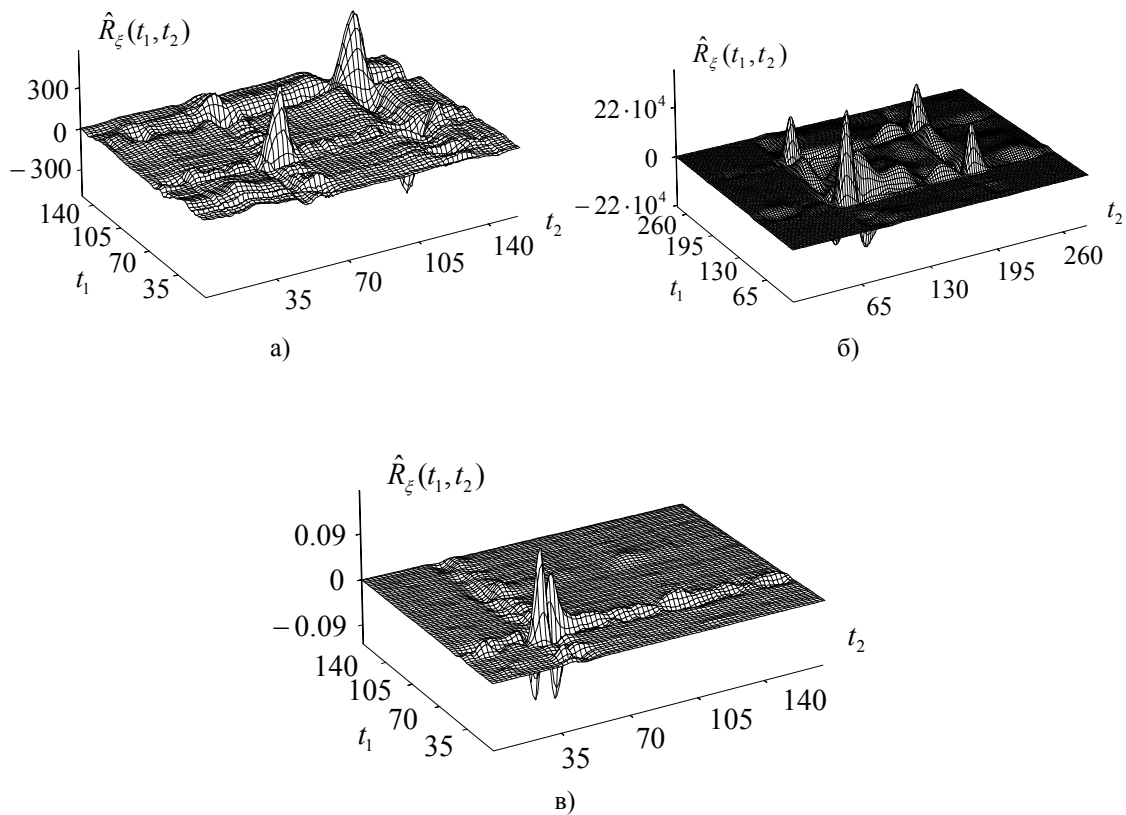


Рисунок 7 – Автокореляційна функція в межах першого циклу ЕКС

а) ЕКС з порушеннями морфологічного характеру;

б) ЕКС з порушенням серцевим ритмом;

в) ЕКС умовно здорової людини.

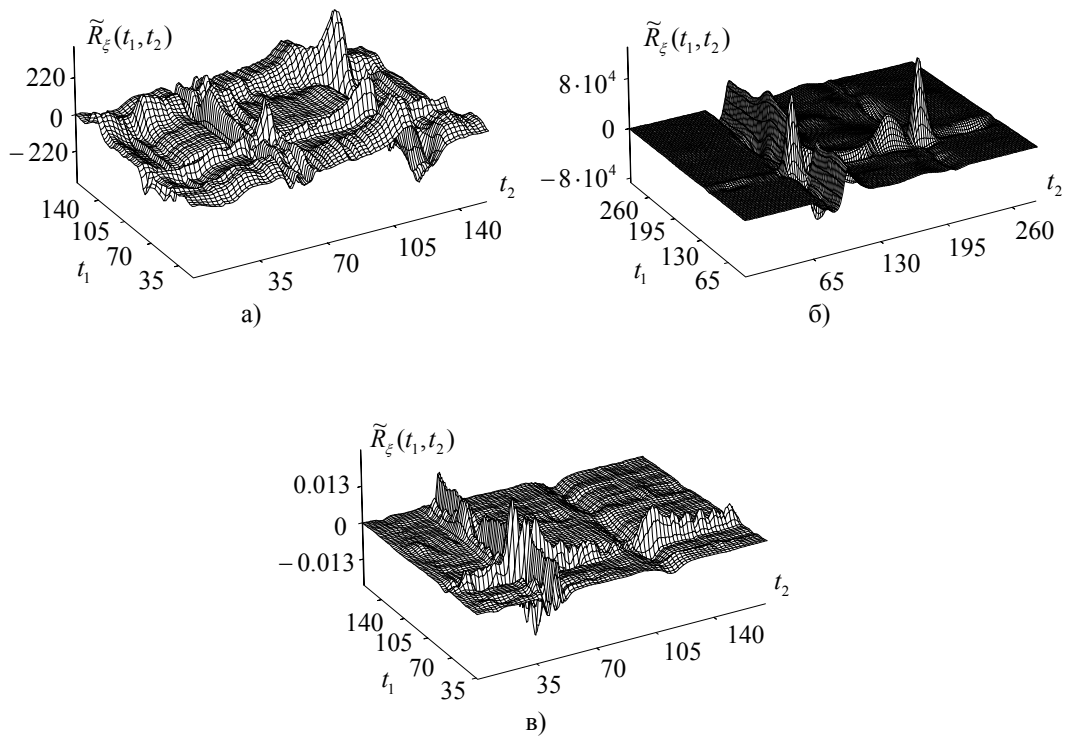


Рисунок 8 – Автокореляційна функція поза межами першого циклу ЕКС

- а) ЕКС з порушеннями морфологічного характеру;
- б) ЕКС з порушенням серцевим ритмом;
- в) ЕКС умовно здорової людини.

Програмний комплекс, за зареєстрованою електрокардіограмою на основі відомих методів [9], дає змогу оцінювати довжини інтервалів PP, TT, QQ, RR, SS для кожного серцевого циклу. Для прикладу графіки сформованих послідовностей $TT(t_{T,n})$, $PP(t_{P,n})$, подані на рис. 9.

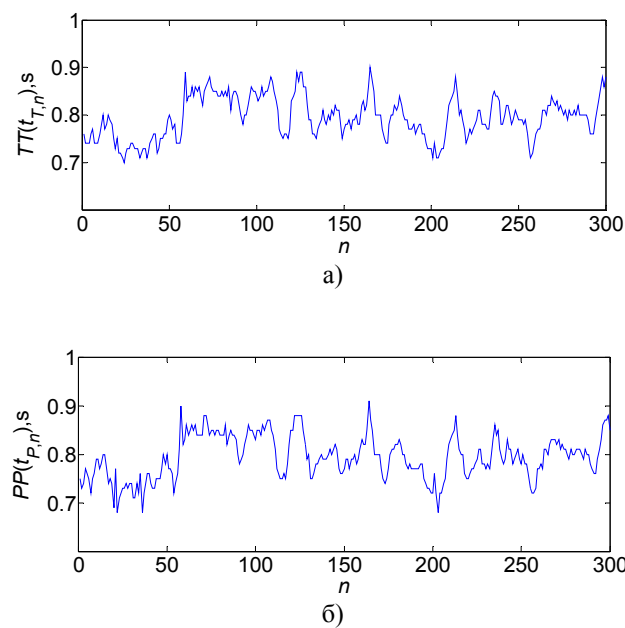


Рисунок 9 – Графіки довжин інтервалів характерних зубців ЕКС
а) TT інтервалів; б) PP інтервалів

На рис. 10 подано графіки функції густини розподілу та функції розподілу для ТТ і РР інтервалів.

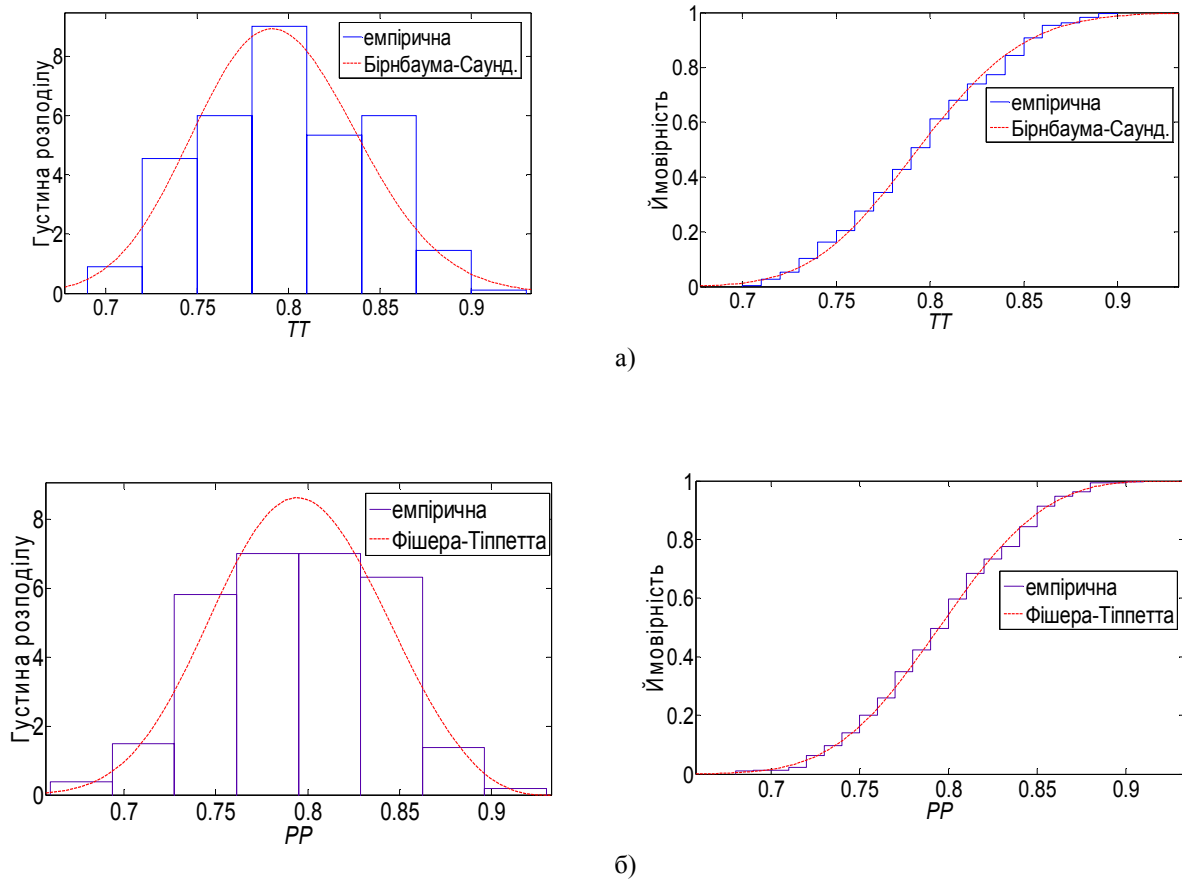


Рисунок 10 – Гістограма, графік функції густини розподілу та функції розподілу
а) ТТ інтервалів; б) РР інтервалів

Отримані результати дають можливість детальніше оцінювати ритм ЕКС, підвищувати інформативність за рахунок використання інформації про довжини інтервалів РР, ТТ, QQ, RR, SS для кожного серцевого циклу, а також за рахунок використання нових інформаційних ознак у вигляді математичного сподівання, дисперсії, диференціальної та інтегральної функції розподілу.

Висновки

Удосконалений програмний комплекс завдяки розширенню його математичного апарату, що ґрунтується на новому підході до моделювання та опрацювання кардіосигналів на базі умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму, дає змогу проводити статистичний морфологічний аналіз та аналіз ритму кардіосигналів із підвищеною інформативністю, що уможливило підвищення точності та достовірності діагностики стану серцево-судинної системи організму людини.

Удосконалений програмний комплекс може бути використаний як складова частина програмного забезпечення автоматизованої діагностичної системи для комплексного морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму на ЕОМ.

Даний програмний комплекс пройшов апробацію на кафедрі фізіології і на кафедрі медичної інформатики Тернопільського медичного університету імені І.Я. Горбачевського та в спільному Українсько-Німецькому товаристві з обмеженою відповідальністю МІДА, м. Київ. На удосконалений програмний комплекс отримано авторське свідоцтво на твір [10].

Список літератури

1. Лупенко С., Студена Ю. Математичне моделювання сигналів серця в задачах технічної кардіометрії на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – Т. 11, №1. – С.134-142.

2. Литвиненко Я. Методи статистичної обробки сигналів серця на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою / Я. Литвиненко, С. Лупенко, Ю. Студена // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — Тернопіль, 2006. — Т. 11, № 4. — С. 189–200.

3. Литвиненко Я.В. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, А.С. Сверстюк // Вісник Хмельницького національного університету. — 2009. — №5. — С.80-87.

4. Драган Я. П. Описание тональных кардиосигналов с помощью модели периодически коррелированных процессов / Я. П. Драган, Г. М. Осухивская // Проблемы управления и информатики, 1999. — № 1 — С. 78–83.

5. Файнзильберг Л. С. Восстановление эталона циклических сигналов на основе использования хаусдорфовой метрики в фазовом пространстве координат / Л. С. Файнзильберг // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 3. — С. 20–28.

6. Файнзильберг Л. С. Новая информационная технология обработки ЭКГ для выявления ишемической болезни сердца при массовых обследованиях населения / Л. С. Файнзильберг // Управляющие системы и машины. — 2005. — № 3. — С. 63–71.

7. Яворська Є. Б. Верифікація результатів спектрального аналізу ритмокардіограми / Є. Б. Яворська // Міжнародний науково-технічний журнал "Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології". — Вінниця, 2009. — №1 (17). — С. 119–121.

8. С. Лупенко. Математичне моделювання циклічних сигналів серця з врахуванням стохастичності їх ритму та морфологічної структури. // Матеріали всеукраїнської наукової конференції ТДТУ. Тернопіль 2009, С.96.

9. I. Lytvynenko. Segmentation and Statistical Processing of Geometric and Spatial Data on Self-Organized Surface Relief of Statically Deformed Aluminum Alloy. // Iaroslav Lytvynenko, Pavlo Maruschak, Sergiy Lupenko, Sergey Panin // Applied Mechanics and Materials, 2015, Vol. 770, pp. 288-293.

10. Литвиненко Я.В. Комп'ютерна програма «Аналіз серцевого ритму з підвищеною інформативністю» / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, Н.С. Луцик // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №59323, від 16.04.2015.

Відомості про авторів

Луцик Надія Степанівна – асистент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

Литвиненко Ярослав Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, Руська 56.

Лупенко Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

Зозуля Андрій Миколайович – здобувач кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.414

О. В. Багацький

ПРОГРАМНА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ДЛЯ ЗБОРУ І ОБРОБКИ ПАРАМЕТРІВ КОМУНАЛЬНИХ ПОСЛУГ

Інститут кібернетики ім. В.М.Глушкова НАН України, м. Київ

Анотація. Запропонована автором архітектура програмної системи, яка була розроблена на основі патернів проектування та описана за допомогою UML-діаграм, дозволяє легко реалізовувати систему для визначення параметрів комунальних послуг, яка складається з однотипних елементів, та зв'язків між ними. Використання запропонованої архітектури дозволить також уніфікувати і вимоги до апаратної складової системи на відповідних ієрархічних рівнях. Як приклад автором була розроблена система, що дозволяє приймати дані з приладу для контролю параметрів електроенергії у споживача в побутовій мережі 220В, оцінювати якість наданої послуги та зберігати отримані результати.

Ключові слова: архітектура програмної системи, комунальні послуги, патерни проектування

Аннотация. Предложенная автором архитектура программной системы, которая была спроектирована на основе паттернов проектирования и описана при помощи UML-диаграмм, позволяет легко реализовывать систему для расчёта параметров коммунальных услуг, которая состоит из однотипных элементов соединённых между собой. Использование предложенной архитектуры позволит также унифицировать и требования к аппаратной составляющей системы на соответствующих иерархических уровнях. В качестве примера автором была разработана система, позволяющая принимать данные с прибора для контроля параметров электроэнергии у потребителя в бытовой сети 220В, оценивать качество предоставляемой услуги и сохранять полученные результаты.

Ключевые слова: архитектура программной системы, коммунальные услуги, паттерны проектирования

Abstract. Proposed by the author a software system architecture, which was designed based on design patterns and described using UML-diagrams, makes it easy to implement a system for calculating parameters of public utilities, which consists of the same elements connected together. Using the proposed architecture will also standardize the requirements for the hardware component of the system according to the appropriate hierarchical levels. To prove that, the author has developed a system that allows getting the data from the device to control the quality of electricity network 220 V, to assess the quality of service provided and to save the received results.

Key words: architecture of a software system, public utilities, design patterns

Вступ

На сьогодні не існує системи обліку комунальних послуг, яка б могла оцінювати кількість і якість всіх комунальних послуг уніфіковано. Існують окремі системи, які дозволяють вести контроль за параметрами однієї послуги, однак системи які контролюють кількість і якість всіх послуг немає. Оскільки системи надання комунальних послуг є ієрархічними системами то і системи для контролю комунальних послуг повинні мати таку ж саму ієрархічну структуру. Такі системи інформаційно-вимірального типу характеризуються наявністю у структурі вимірвальних пристроїв та приладів, а також цифрової частини, які з'єднуються між собою у певній послідовності [1]. Система повинна розраховувати дані, які є специфічними для кожної комунальної послуги, зберігати отримані результати, видавати їх при запитах та реагувати на аварійні ситуації. Важливо, щоб система контролю комунальних послуг мала можливість масштабування, тобто як додавання одного або декількох елементів на одному з рівнів ієрархії так і додавання ще одного рівня ієрархії. Необхідно передбачити механізми зв'язку, за якими буде відбуватися передача даних між рівнями ієрархії. Для системи бажано також передбачити механізм для налаштування за допомогою оператора.

Актуальність

В наш час в Україні здійснюється переведення абонентських та лічильникових систем контролю параметрів комунальних послуг в централізовані ієрархічні комп'ютерні системи, тому актуальною є задача створення уніфікованого програмного забезпечення для таких систем.

Мета

Метою роботи є розробка архітектури системи, на основі якої можливе створення модульної системи різних рівнів ієрархії, яка дозволяє одночасно проводити як збір, так і обробку даних для всіх комунальних послуг.

Задачі

1. Аналіз архітектури існуючих систем обліку комунальних послуг.
2. Опис запропонованої системи з використанням UML-діаграм.

3. Створення частини системи для одного з рівнів ієрархії, з використанням патернів проектування та урахуванням сформульованих вимог до системи обліку комунальних послуг.

Структура систем, які забезпечують контроль за параметрами комунальної послуги

Розглянемо систему, структура якої наведена на рис. 1. Інформація про параметри комунальної послуги надходять від декількох лічильників (приладів), які можуть передавати виміряні параметри комунальної послуги по каналах зв'язку до концентратора, який знаходиться у квартирі. Після обробки даних концентратором, він надсилає ці дані до мультиконцентратора, що обробляє дані з усього будинку, який, в свою чергу, передає оброблені дані на вищий рівень ієрархії.

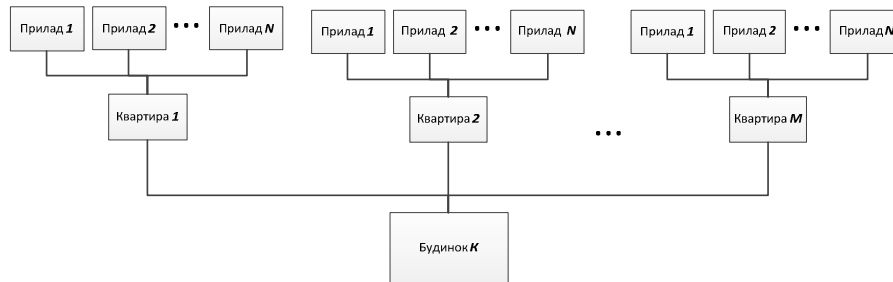


Рисунок 1 – Приклад ієрархічної системи, яка складається з трьох рівнів.

На кожному рівні ієрархії відбувається обмін інформацією – об'єкт нижчого рівня передає отримані дані до об'єкта вищого рівня, де вони обробляються та передаються далі. Бажано створити програму, яку можливо адаптувати для будь-якого рівня ієрархії. Отже, програмна частина системи для контролю комунальних послуг буде складатися з архітектурно однакових частин, з'єднаних ієрархічними зв'язками. Вони будуть відрізнятися на різних рівнях ієрархії об'єктами, від яких отримуються та передаються дані, алгоритмами обробки даних, можливостями збереження даних та взаємодії цих частин з оператором. Такий модульний підхід значно скорочує час розробки всієї програмної частини системи та полегшує подальше обслуговування та модернізацію.

Архітектурні складові програмної частини можуть бути описані за допомогою патернів (patterns) проектування [7]. Патерн проектування – це сукупність класів та зв'язків між ними (за виключенням патерну Singleton, який завжди реалізується одним єдиним класом), які акцентують увагу на особливостях певної реалізації програмного коду. Перевагами патерну є полегшення супроводження програми та можливість повторного використання частин програм при створенні нової програми.

Використання патернів проектування дозволяє абстрагуватись від мови програмування та використовувати програмні конструкції, які вже перевірені на практиці в різних мовах програмування. Для опису конструкцій, за необхідності, можна використовувати UML-діаграми.

Таким чином, достатньо сконструювати архітектуру за допомогою патернів лише для однієї ланки ієрархії, а потім розширити цю архітектуру на всю систему, незалежно від кількості рівнів ієрархії.

Опис архітектури запропонованої системи

На рис.2 зображений рівні ієрархії «Прилад» та «Квартира». Необхідно, щоб на рівні «Квартира» у концентраторі функціонувала програма, яка реалізує функції отримання даних з рівня «Прилад». Оскільки кожен з приладів, які оцінюють параметри комунальної послуги, працюючи у режимі реального часу та надсилає дані асинхронно, доцільно використовувати для отримання результатів мультипоточність.

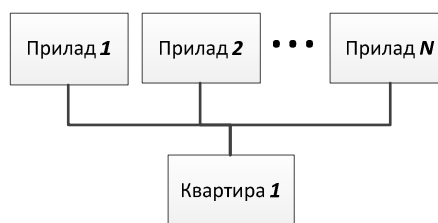


Рисунок 2 – Рівні ієрархії «Прилад» та «Квартира».

Крім того, в програмі необхідно передбачити:

- 1) кількість даних, що передаються;
- 2) алгоритми шифрації/дешифрації, корекції/контролю помилок та ін.;
- 3) буфер даних, в який, при неможливості миттєвої обробки, запам'ятовувались передані дані;
- 4) унікальний ідентифікаційний код, за допомогою якого можливо визначити конкретний прилад.

Для подальшої передачі даних або довготривалого зберігання їх у концентраторі необхідно передбачити механізм збереження та/або передачі даних на наступний рівень ієрархії.

Також необхідно передбачити наявність програмного модулю який обробляє дані про стан приладів та режим роботи концентратора. В програмі концентратора необхідно передбачити реакцію на вибір режимів роботи з органів керування.

Програмне архітектурне рішення для уніфікованої системи збору та обробки даних комунальних послуг.

Слід зауважити, що у цій статті пропонується лише один спрощений конкретний варіант реалізації архітектури. Можливі і інші архітектурні реалізації, які будуть базуватися на використанні інших патернів проектування.

У запропонованій архітектурі умовно виділяється сім незалежних частин, кожна з яких виконує певні завдання. Такі частини наведені нижче

1. Довідка – дані, які потрібні для інтерпретації даних, отриманих з приладу. Використовується патерн Singleton, оскільки потрібно гарантувати унікальність цієї частини системи та можливість звернення до цієї частини будь-якого іншого елемента.

2. Арбітер – сутність, яка контролює послідовність виконання алгоритмів та доступу до інших частин. Використовується патерн Mediator, який призначений для зменшення зв'язків між класами.

3. Алгоритми – алгоритми, які можуть бути задіяні для всіх об'єктів. Необхідне використання Патерн Strategy використовується для створення сімейства алгоритмів, які не залежать від контексту їх використання.

4. Прилад – під приладом у цій програмній моделі розуміється джерело інформації, яке сумісне з концентратором хоча б на п'яти рівнях (від фізичного до сеансового) моделі ISO/OSI [8]. Для створення такого джерела інформації фізичний прилад повинен бути під'єднаний до входу концентратора. У квартирі можливо використовувати тільки один прилад, який вимірює параметри певної комунальної послуги. Прилади відрізняються один від одного лише кількістю переданих параметрів. Використовуються патерни FactoryMethod, який дозволяє легко контролювати місце появи даних з приладу у кодї програми та Critical Section, для використання мультипоточності.

5. Записувач – сутність, яка надає інтерфейси для збереження даних. Використовується патерн FactoryMethod, оскільки він дозволяє легко додавати нові методи збереження даних.

6. Інтерфейс користувача (GUI) – сутність, яка дозволяє приладу для збору даних виводити свої дані для інформування користувача. Використовується патерн Builder, оскільки реалізація інтерфейсу користувача є складною та може змінюватися на різних рівнях ієрархії.

7. Уніфікований інтерфейс передачі даних від користувача до концентратора, що дозволяє налаштування певних елементів системи. Використовується патерн Command, як стандартний патерн для операцій цього типу.

Організація фізичних міжієрархічних зв'язків залежить від апаратної конфігурації системи і не розглядається в даній статті.

На рис. 3 представлена UML-діаграма класів на мові програмування C++, яка спрощено описує систему для збору та обробки даних комунальних послуг. Показані лише декілька варіацій класів-нащадків SomeAlgoritms_SrategyPattern та DeviceAlgoritms_SrategyPattern (програмна реалізація частини «Алгоритми»), Creator_GUI та GUI_BuilderPattern (програмна реалізація інтерфейсу користувача); клас Device_MediatorPattern має тільки одну реалізацію через класи SomeDevice та Device_FactoryMethodPattern; клас Writer представлений тільки одною реалізацією – Writer_to_XML.

Найбільш складним при створенні класів, які показані на рис.3, є реалізація патерну Mediator для класу Arbiter_MediatorPattern. Цей клас є ключовим для взаємодії між собою інших частин програми, тому що саме цей клас реалізує передачу даних на вищий рівень ієрархії.

Клас Devices_MediatorPattern, який реалізує взаємодію між різними класами, створює нові потоки (threads) даних, що, згідно [9], ускладнює внутрішню структуру цієї частини програми.

Клас Init_Knowledge_SingletonPattern містить у собі константи, необхідні для початкової ініціалізації програми на концентраторі.

Клас Init_Device_SingletonPattern містить у собі константи, які потрібні при визначенні відомих алгоритмів передачі даних під'єднаних приладів.

При ініціалізації приладу існує два варіанта поведінки «прилад – концентратор»:

1. Активний. Прилад має свій унікальний ідентифікаційний номер, який передає до концентратора, за допомогою потоку передачі даних. В такому випадку концентратор реєструє наявний унікальний ідентифікатор у масиві ідентифікаторів, формує чергу, за якою опитує прилад та приймає і передає дані до конкретних класів-нащадків GUI_BuilderPattern та Saver. Під'єднаний прилад вважається концентратом «під'єднаним» та «справним».

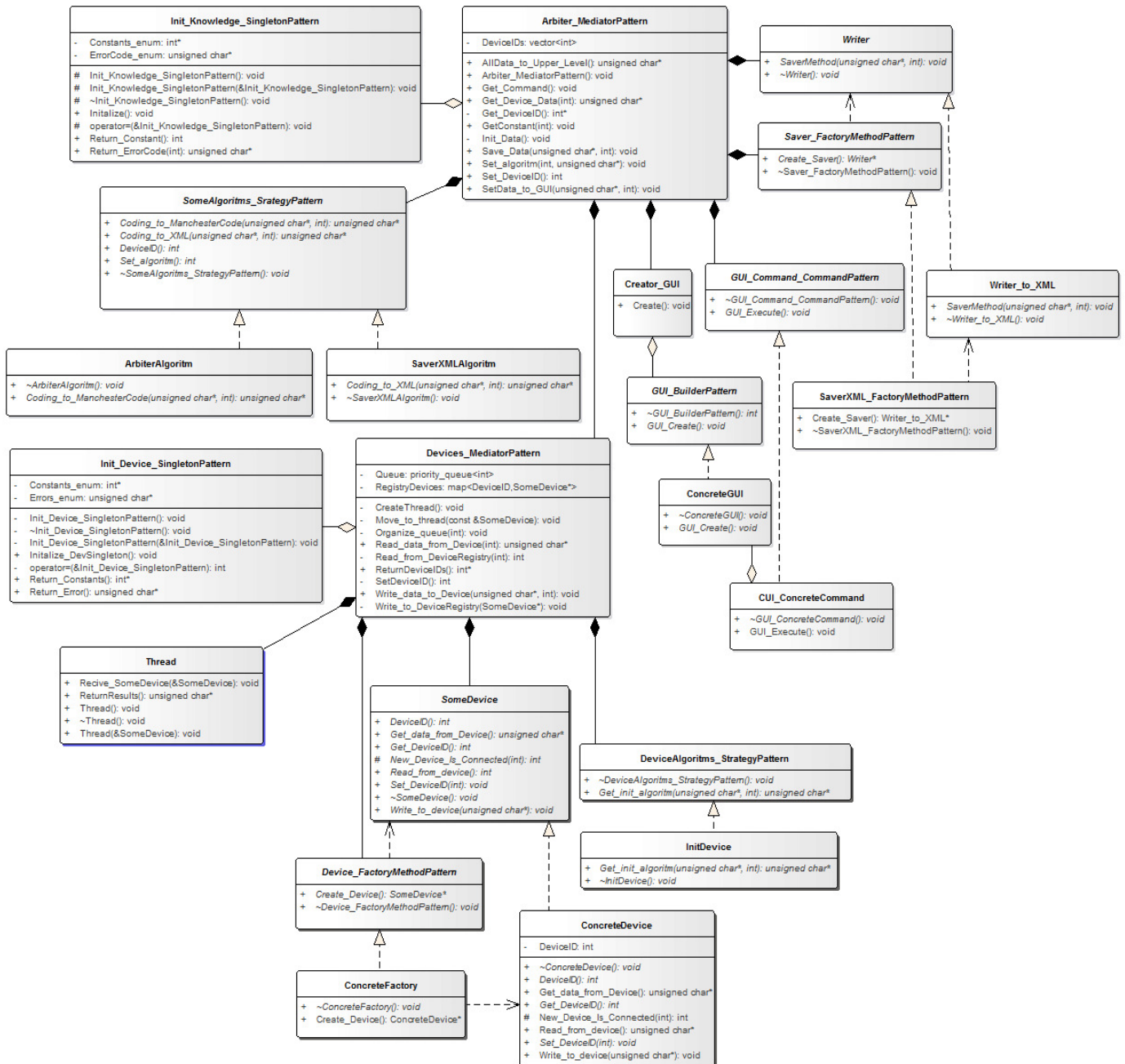


Рисунок 3 – Спрощена UML-діаграма класів системи для збору та обробки даних комунальних послуг.

2. Пасивний. При під'єднанні приладу створюються нові нащадки класу SomeDevice, які за допомогою аналізу даних визначають тип приладу. Якщо аналіз дозволяє ідентифікувати тип приладу та кодування – прилад вважається «під'єднаним». Клас Devices_MediatorPattern створює унікальний ідентифікаційний номер для класу-нащадку SomeDevice, який може базуватися на алгоритмах – нащадках класу DevicesAlgorithms_StrategyPattern. Так само як і у «активному» варіанті поведінки, концентратор, після передачі ідентифікатору до конкретного «під'єданого» приладу Devices_MediatorPattern, реєструє цей прилад у масиві ідентифікаторів RegistryDevices map<DeviceID, SomeDevice*>, формує чергу Queue

priority_queue<int>, за якою буде опитуватися прилад та виконувати операції «запису-читання» приладу. Після ресстрації даних «під'єднаний» прилад вважається «під'єднаним» та «справним».

Бажано використовувати «пасивний» варіант поведінки, оскільки такий варіант легко масштабується на наступні рівні ієрархії.

При запуску програми створення класів відбувається у такій послідовності: створення класу Init_Knowledge_SingletonPattern; створення класу Arbiter_MediatorPattern; створення та ініціалізація Algorithms_StrategyPattern та його нащадків; створення класів, що реалізують операції збереження даних (Saver та Saver_FactoryMethod і їх нащадки); створення класів для виводу інформації (GUI_BuilderPattern та його нащадки) і взаємодії з користувачем (GUI_Command_CommandPattern та його нащадки); створення класу Devices_MediatorPattern, після чого створюються класи Init_Device_SingletonPattern, Thread, SomeDevice та Device_FactoryMethodPattern і його нащадки.

Клас Thread реалізує потік (thread) та інкапсулює в собі програмну та апаратну реалізацію цього потоку. Використання мультипоточності класом Devices_MediatorPattern переслідує наступні цілі:

1. Отримання даних у режимі реального часу. Дані з під'єднаних приладів обробляються нащадком класу SomeDevice, який переміщується у свій потік після створення та ініціалізації.

2. Обрахування великої кількості даних. На більш високих рівнях архітектури необхідно збирати та обробляти дані з тисяч елементів, для чого можуть бути використані складні багатопроекторні системи.

Для реалізації мультипоточності класом Thread доцільно використовувати «протопотоки» («protothreads») [10], як компромісний варіант між створенням нестандартної реалізації мультипоточності та аналогом класу «thread» у мові програмування C++ редакції 2011 року [11] або «thread» з бібліотеки boost [12]. Використання стандартних бібліотек значно полегшує подальше обслуговування та модернізацію такої системи. Обслуговування потоків відбувається динамічним способом визначення пріоритетів (наприклад [13], LRU, FIFO та ін.) за допомогою алгоритмів класів-нащадків з DevicesAlgorithms_StrategyPattern. Оскільки в основі цих алгоритмів знаходиться черга та маніпуляції з її індексами, необхідно, щоб такий алгоритм був потокобезпечним [8].

Класи Saver та Saver_FactoryMethod і їх нащадки відповідають за збереження даних приладів та передачу цієї інформації на вищий рівень ієрархії. Збереження даних може відбуватися як у ОЗП так і енергонезалежну пам'ять, тому необхідно передбачити можливі механізми запису та доступу для різних сценаріїв збереження даних (наприклад, кешування [14]).

Класи Creator_GUI і GUI_BuilderPattern та його нащадки використовуються для забезпечення індикації певних даних, які обробляє концентратор для інформування користувача.

Клас GUI_Command_CommandPattern та його нащадки використовуються для налаштування користувачем концентратора.

На рис.3 класи GUI_BuilderPattern та GUI_Command_CommandPattern представлені схематично, оскільки існує велика кількість варіантів фізичної реалізації GUI та елементів керування, від якої буде залежати і програмна реалізація цих функцій.

Практична реалізація мультипоточності на прикладі програми для пристрою «Якість-Е1»

Для написання програми, яка приймає результати вимірювання пристрою «Якість-Е1» було обрано мову програмування Qt. Ця мова створювалася на базі мови C++ саме для створення програм з графічним інтерфейсом для користувача (GUI), що дозволяє використовувати синтаксис C++. Крім цього, у Qt є можливість використовувати потоки (Qthreads), які є платформонезалежними. Такий вибір дозволяє створити мультиплатформну (Windows / *nix) програму, яка через протокол USB буде приймати дані та обробляти їх. Крім того, передбачена можливість прийняття даних через інші інтерфейси зв'язку (COM-порт, Ethernet та ін.) та їх збереження у форматі XML.

Головним мотивом використання мультипоточного програмування в цій програмі є не пришвидшення розрахунків, а можливість якнайшвидше приймати дані, які передає прилад. У програмі можна виділити щонайменше дві асинхронні задачі: отримання даних від приладу та відображення (або збереження) їх на приладі, який є USB-хостом.

Слід зауважити, що і динамічна бібліотека, і частина програми вводу-виводу написані на C++ та фактично є головною її частиною. Щоб зробити цю програму мультиплатформною, необхідно компілювати її як під Windows, так і під Linux, використовуючи для цього компілятор C++/C mingw.

Висновки

Використання запропонованої архітектури дозволить зменшити час на розробку програмного забезпечення для концентраторів на всіх рівнях ієрархії систем для збору і обробки даних про параметри комунальних послуг та зменшити час для розробки всієї системи.

Крім того, архітектура легко адаптується для певної апаратної модифікації, що призведе до уніфікації вже існуючого апаратного забезпечення.

УДК 621.316:681.5

О. В. Кириленко¹, С. П. Денисюк², С. Є. Танкевич¹, Т. М. Базюк²

ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ МУЛЬТИАГЕНТНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІЗ АКТИВНИМ СПОЖИВАЧЕМ

¹ Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ;² Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ», м. Київ

Анотація. Створено технологічну платформу для забезпечення комплексної ефективної діяльності об'єднаної енергосистеми України з активним споживачем, що охоплює нормативну базу, інформаційне забезпечення, а також моделі активного споживача та його взаємодії із системним оператором. Розроблено інформаційні моделі, що дозволяють створити еталонну архітектуру ОЕС України, яка відповідає міжнародним нормам, враховувати всі необхідні аспекти побудови Smart Grid систем. Сформовано систему механізмів «активізації» споживачів, яка орієнтована на потреби та інтереси споживача. Розроблено алгоритм визначення потенціалу активної поведінки такого споживача електроенергії. Визначено заходи, що забезпечують ефективну взаємодію активних споживачів між собою та із системним оператором. З метою оптимізації режимів роботи обладнання споживача та мережі створена модель активного споживача.

Ключові слова: мультиагентне керування, активний споживач, нормативне забезпечення.

Аннотация. Создано технологическую платформу для обеспечения комплексной эффективной работы объединенной энергосистемы Украины с активным потребителем, которая включает нормативную базу, информационное обеспечение, а также модели активного потребителя и его взаимодействия с системным оператором. Разработаны информационные модели, позволяющие создать эталонную архитектуру ОЭС Украины, которая соответствует международным нормам, учитывать все необходимые аспекты построения Smart Grid систем. Сформировано систему механизмов «активизации» потребителей, ориентированную на потребности и интересы потребителя. Разработано алгоритм определения потенциала активного поведения такого потребителя электроэнергии. Определены мероприятия, обеспечивающие эффективное взаимодействие активных потребителей между собой и системным оператором. С целью оптимизации режимов работы оборудования потребителя и сети создана модель активного потребителя.

Ключевые слова: мультиагентное управление, активный потребитель, нормативное обеспечение.

Abstract. A technology platform to ensure the effective operation of interconnected power system of Ukraine with energy prosumer is created. It includes regulatory framework, information support and prosumer models with relationship with the system operator. The information model to create a reference architecture UES Ukraine which meet international standards necessary to consider all aspects of building Smart Grid systems. The system mechanisms "enhance" customer-oriented to the needs and interests of the consumer. An algorithm for determining the potential of active behavior of the consumers. The measures to ensure the effective interaction of active customers among themselves and with the system operator. For the purpose of optimization of customer equipment and network model set active consumer.

Keywords: multiagent control, prosumer, regulations.

Вступ

Розвиток та поширення концепції Smart Grid призводить до суттєвих змін у підходах до керування в галузі електроенергетики і у правилах взаємодії учасників на ринку електроенергії. Виникають нові учасники ринку та додаткові можливості у існуючих учасників. В першу чергу це стосується споживачів електроенергії, які досі виконували роль лише споживачів послуг ринку. Сучасний рівень розвитку технологій дозволяє створити умови для змін досі «пасивної» поведінки учасників ринку на «активну». Слід зазначити, що активний споживач разом із ефективним мультиагентним керуванням широко застосовуються у провідних розвинутих країнах Заходу. Робота таких активних споживачів у електроенергетичних системах дає суттєвий економічний і технологічний ефект (до 10%) за рахунок використання систем керування попитом, використання джерел розосередженої генерації та технологій накопичення енергії. Українській електроенергетиці сьогодні вкрай важливо здійснити впровадження активного споживача в рамках модернізації електроенергетичної системи та стимулювати таких споживачів до участі у регулюванні навантаження. Однак, існує ряд обмежень, що перешкоджають на сьогодні реалізації активного споживача в Україні.

Тому метою роботи було створити основу для розробки заходів з усунення цих обмежень за рахунок визначення необхідної нормативної бази, розробки архітектур інформаційних систем та технологічної платформи зв'язків активного споживача із інтелектуальною електроенергетичною системою.

Одним із базових підходів концепції Smart Grid є клієнтоорієнтованість, коли споживач набуває властивостей активного учасника ринку електроенергії, і самостійно формує вимоги до якості та характеру послуг. Активний споживач – це такий споживач енергії, що реалізує функції пасивного покупця та функції взаємодії з мережею енергопостачання, впливаючи на її стан та ціни на ринку.

Активний споживач, виходячи зі своїх потреб та можливостей, може:
 оптимізувати графік завантаження своїх власних потужностей, як з метою мінімізації власних витрат на енергію, так і з метою отримання доходу від продажу енергії та потужності на ринок, або ж надання різного роду додаткових послуг системному оператору чи іншим споживачам;
 продавати вироблену або накопичену власним обладнанням електроенергію;
 керувати власним навантаженням та надавати відповідні послуги з керування навантаженням інших споживачів.

Проведено аналіз можливостей активного споживача в залежності від встановленого обладнання. Бралося до уваги основне обладнання, використання якого створює умови до перетворення звичайного (пасивного) споживача електроенергії на активного: джерела розосередженої генерації; системи керування навантаженням споживача; пристрої акумулювання електроенергії.

Використання джерел розосередженої генерації та систем керування навантаженням під час їхньої експлуатації передбачає отримання максимального прибутку, що проявляється через реалізацію виробленої або зекономленої електроенергії та отриманні компенсацій або плати за надані додаткові послуги. Тому, при коригуванні режимів роботи системи електропостачання із активними споживачами, для самих активних споживачів дана задача є першочерговою. Звичайно, комбінування кількох типів обладнання активного споживача сприяє отриманню кращого економічного ефекту.

Досліджено, що для визначення можливості споживача керувати власним навантаженням необхідно мати наступну інформацію: дані про електроспоживання підприємства (галузь економіки; структура електроспоживання; типові добові та річний графік споживання); технологічну схему електропостачання споживача та режими роботи обладнання; потенціал власної генерації електричної потужності та режимів генерації; максимально допустиму величину зниження потужності споживання об'єкту та час його безбиткового підтримання; затрати підприємства на зміну режиму роботи підприємства (чи обладнання) з метою короткотривалого зменшення споживаної потужності.

Визначено, що ефективна система керування попитом в електроенергетиці включає в себе технологічні аспекти – контроль перетоків, систему обліку, а також ринкові аспекти – систему модифікації тарифів і цін. Така система найкраще проявляє себе із застосуванням мультиагентного підходу до керування. Мультиагентна система керування (МАСК) – це багаторівнева багатозв'язна система керування, з вирішенням багатокритеріальних задач в умовах невизначеності. Основні можливості МАСК: використання засобів адаптації до змін середовища, можливість модифікації її структури і параметрів безпосередньо в процесі функціонування; застосування динамічного моделювання в реальному часі з прогнозуванням стану енергосистеми; можливості інформаційного обміну не тільки даними, але й знаннями; застосування паралельних обчислень; здатність здійснювати керування станом технічних комплексів і систем на основі розподілених інформаційних мереж і гнучкої інфраструктури обчислювальних компонентів.

Організаційна модель МАСК описується багатофакторним вектором стану всієї сукупності агентів, тому доцільно використовувати гібридну архітектуру МАСК, доповнену системою моделювання, що дозволяє агенту забезпечити вибір стратегії і виконати дії для досягнення цілей. Визначено, що така архітектура має містити: спеціалізовані бази знань для представлення інформаційних потреб функціонування різних агентів; моделі процесів; функціонально повну підсистему спеціалізованих агентів для пошуку, обробки і розподілу інформації; підсистему прогнозуючого моделювання; підсистему формування критеріїв і обмежень; підсистему моделювання та координації взаємодії між агентами, організації кооперативної поведінки, забезпечення сумісності агентів; підсистему формування керуючих впливів і реалізації керування; підсистему аналізу і планування.

Були визначені структури та особливості реалізації сучасних МАСК. Визначено переваги таких систем, сформовано вимоги та створено основу архітектури інформаційних систем керування інтелектуальними енергосистемами на основі МАСК, що дає можливість їх впровадження в Україні.

Нормативне забезпечення

Актуалізація нормативної бази в енергетиці особливо важлива, зважаючи на швидкий розвиток світової та вітчизняної електроенергетики внаслідок інтелектуалізації та інформатизації галузі та на євроінтеграційний курс України та відповідно до договору про заснування Європейського Енергетичного Співтовариства (ЄЕС) [1], ратифікованого Україною. Постає питання про формування єдиних підходів щодо впровадження концепції Smart Grid, а отже й питання формування нормативної бази інтелектуальних електроенергетичних мереж із активним споживачем. Активний споживач, як зазначалося вище є невід'ємною складовою інтелектуальної електроенергетичної мережі і тому, в значній мірі, впровадження стандартів зі сфери Smart Grid є необхідною умовою активізації споживача.

На сьогодні провідними організаціями зі стандартизації розроблено ряд нормативних документів у сфері Smart Grid, і вони чинні тривалий час. Насамперед це стосується стандартів зі сфери інформацій-

них технологій в енергетиці. Сьогодні загалом понад 100 стандартів ІЕС можна визначити, як пріоритетні для реалізації концепції Smart Grid.

Основним завданням стандартизації концепції Smart Grids є комунікації на всіх ієрархічних рівнях енергосистем. Безпечне, надійне та економічне енергопостачання тісно пов'язане зі швидкою, ефективною та надійною комунікаційною інфраструктурою енергосистеми, тому проектування та побудова комунікаційних мереж потребує такої самої високої точності та надійності, як і системи електропостачання. Високопродуктивний зв'язок між усіма складниками системи – це основна мета концепції Smart Grid. Це означає, що зв'язок має бути засновано на спільних даних, загальних протоколах їхнього передавання та єдиній концепції мережі, що має бути відкрита для ефективного інтегрування. Сьогодні вже набули чинності стандарти ІЕС щодо функціональної сумісності складників систем згідно з концепцією Smart Grid. Наприклад, стандарт ІЕС 62357-1 дає змогу адресно налагодити зв'язок між підсистемами моделі Smart Grid. Основним завданням цього стандарту є зближення моделей даних, сервісів і протоколів для ефективного та перспективного системного інтегрування для всіх підсистем моделі.

Сучасна система керування мережею забезпечує сервісно-орієнтовану архітектуру з уніфікованими процесами, взаємодією та комунікаціями на основі багаточастинних стандартів ІЕС 61968 та ІЕС 61970. Вони формують основу для інтегрування системи керування мережею в середовищі електропостачальної компанії.

Щоб бути конкурентоспроможними на нерегульованому ринку енергоносіїв, перед енергетичними компаніями сьогодні стоїть невідкладне завдання – оптимізувати свої процеси. Це єдиний спосіб, за допомогою якого вони можуть конкурувати в цьому середовищі. Важливим кроком для цього є об'єднання значної кількості автономних ІТ-систем в однорідну глобальну ІТ-систему. Наявні звичайні системи керування мережею можна інтегрувати лише зі значними труднощами, оскільки вони не використовують єдині стандарти даних. Мережу систем керування зі стандартизованим форматом даних базовано на Загальній інформаційній моделі (СІМ) відповідно до ІЕС 61970 і вона є найкращою основою для ІТ-інтегрування. Іншим важливим аспектом роботи ринку електроенергії є розроблення моделей інформаційного обміну між учасниками ринку, основні вимоги до якого визначені в багаточастинному стандарті ІЕС 62325 «Інфраструктура комунікацій на енергоринку». Зокрема цей стандарт надає загальні рекомендації щодо побудови бізнес-моделей функціонування сегментів ринку електроенергії, визначає вимоги щодо інформаційного забезпечення ринку та розкриває особливості побудови СІМ для учасників та суб'єктів ринку.

Наступним важливим аспектом концепції Smart Grid є протоколи передавання даних. Основним стандартом у цій сфері є багаточастинний стандарт ІЕС 61850. Окремі стандарти у його складі набули чинності ще у 2004 році, і стандартизують зв'язок у системах автоматизації підстанцій. На сьогодні сфера застосування цього багаточастинного стандарту поширюється не лише на електричні підстанції, а й пропонує надзвичайно гнучкі технології для побудови комунікаційного середовища систем автоматизації електроенергетичних підприємств та між ними.

Також важливим аспектом впровадження систем Smart Grid є стандартизація їх технологічного базису [2]. Насамперед, йдеться про інтелектуалізацію системи передавання електроенергії. До сучасних перспективних систем передавання електричної енергії належать технології FACTS (гнучкі системи передавання змінного струму) та HVDC (системи постійного струму високої напруги). Основним чинним стандартом на такі системи є багаточастинний стандарт ІЕС 60919, а основним стандартом на сумісність обладнання в таких системах є ІЕС 60870-5 та ІЕС 61850.

Важливим кроком на шляху створення інтелектуальної енергетичної системи із активним споживачем є використання джерел розподіленого генерування. Генерування енергії для споживачів має бути економічним та відповідати вимогам щодо екологічності та безпеки. В ІЕС чинна низка стандартів щодо джерел розподіленої генерації:

- для енергії сонця: ІЕС 61724; ІЕС/TS 61836; ІЕС 62446; багаточастинні стандарти ІЕС 60904; ІЕС 61730; ІЕС/TS 62257 тощо;

- для енергії вітру: ІЕС 61400-1; ІЕС 61400-2; ІЕС 61400-3;

- для енергії припливів: ІЕС 62600-1; ІЕС 62600-100; ІЕС 62600-200.

Сумісність обладнання в таких системах регламентовано в основному багаточастинними стандартами ІЕС 61400-25 та ІЕС 61850, що є найперспективнішим та повноцінним рішенням для інтегрування відновлюваних джерел енергії в енергосистему.

Інформаційне забезпечення

Як зазначалося вище, застосування інформаційно-комунікаційних технологій у електроенергетичних системах поряд із розширенням можливостей керування призводить також і до утворення нової структури систем із численними новими учасниками, безліччю додатків і мереж, які мають спільно функціонувати і ефективно взаємодіяти між собою. Цього можна досягти лише у тому разі, якщо буде

доступний узгоджений набір моделей, що дозволять детально описувати системи, регламентувати комунікаційні зв'язки та протоколи, а також встановлювати певні правила щодо організації процесу керування. Такі моделі дозволяють розробляти, так звану, еталонну архітектуру [3]. Еталонна архітектура системи представляє собою концептуальну модель системи і задає специфікацію її спільних об'єктів, сервісів, інтерфейсів. Тобто, еталонна архітектура – узагальнений інструмент опису, дослідження та розробки архітектури конкретної системи. Метою еталонної архітектури є можливість розділення складних систем (якими, априорі, є системи Smart Grid) на об'єкти, які можна відокремити один від одного згідно з певними принципами. Існує кілька підходів до розгляду інтелектуальних систем і проведення їх розподілення.

Першим, слід визначити розробку концептуальної архітектури, яка є високорівневим представленням основних учасників системи, основних бізнес областей (вузлів) системи та їх взаємодії.

Функціональна архітектура є систематизацією функцій та їх підфункцій, інтерфейсів (внутрішніх і зовнішніх) і визначає послідовність виконання, умов для потоків даних або керування, а також вимоги до функціонування та робочих характеристик.

Наступна, комунікаційна архітектура є формалізованим описом системи обміну інформацією між автоматизованими системами керування, її компонентами та електроенергетичними об'єктами. Фактично, мова йде про відображення функціональної архітектури, але із значним акцентом на систему зв'язку.

Архітектура інформаційної безпеки є специфікацією складових із забезпечення безпеки інформаційного обміну у відповідності до набору принципів щодо розробки таких систем.

Інформаційна архітектура являє собою узагальнене, але чітко визначене представлення учасників, включно з їх функціями, властивостями та взаємозв'язками. Ця архітектура, в значній мірі, базується на СІМ технології, що знаходить широке застосування сьогодні для формалізації моделі опису ЕЕО, обміну інформацією про їх структуру, обладнання і топологію та методології УММ, яка дозволяє створювати об'єктно-орієнтовані (рольові) моделі сегментів ринку.

І на кінець, сервіс-орієнтована архітектура, що не залежить від застосовуваної технології та організовує окремі функції, що виконують зовнішні або сторонні програми і елементи систем у взаємозамінні, застандартизовані сервіси, які можуть бути об'єднані та швидко використані відповідно до потреб певного ЕЕО.

Розроблення зазначених інформаційних архітектур є невід'ємною частиною вимог до побудови та впровадження технологій Smart Grid в Україні.

Моделювання роботи активного споживача

Реалізація стратегії активного споживача передбачає узгодження режимів роботи обладнання споживача та мережі. З метою оптимізації таких режимів була створена математична модель активного споживача, в якій виділено кілька складових основного оптимізаційного завдання. Загальна модель поведінки передбачає формування таких складових оптимізаційної задачі: 1) мінімізація витрат на електроенергію; 2) максимізація прибутку від продажу електроенергії та надання окремих системних послуг; 3) оптимізація споживання (вибір та дотримання оптимального графіку споживання); 4) оптимізація конфігурації мережі та параметрів системи електропостачання; 5) вибір оптимальних режимів роботи; 6) оптимізація режимів роботи системи енергопостачання; 7) оптимізація виробництва та використання електроенергії, виробленої від власних джерел розосередженої генерації; 8) мінімізація впливу на екологію; 9) інші можливі вигоди. В залежності від особливостей та можливостей того чи іншого споживача, а також потреб системи електропостачання формується окрема оптимізаційна задача [4].

Кожна із складових представляється відповідною моделлю. Наприклад, для вирішення оптимізаційної задачі мінімізації витрат на електроенергію враховуються такі складові оптимізаційної задачі: профіль споживання електроенергії обладнанням споживача; профіль генерації електроенергії власним генеруючим обладнанням; обсяги споживання та генерації; значення тарифів на генеровану та споживану енергію; зовнішні умови що впливають на параметри споживання (температура, пора року, тривалість дня); проміжні витрати на переналаштування обладнання; втрати оцінені як відхилення від запланованого профілю споживання; витрати на оплату спожитої енергії та інші.

Кожен із параметрів загальної оптимізаційної задачі має різну степінь важливості для споживача. Тому, для формування найбільш точного вирішення оптимізаційної задачі запропоновано використовувати узагальнений критерій, який визначається методом скаляризації:

$$F_c(X) = \alpha_1 F_1(X) + \alpha_2 F_2(X) + \dots + \alpha_n F_n(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i F_i(X),$$

де $F_i(X)$ – вектор оптимізованих параметрів системи;

α_i – коефіцієнти скаляризації або критерії важливості, які визначаються експертним шляхом.

Розмірність векторів $F_1(X), \dots, F_8(X)$ може бути різною. Векторні коефіцієнти дозволяють на базі векторів $F_1(X), \dots, F_8(X)$ побудувати узагальнений критерій, який може бути як скалярний так і векторний.

Розв'язком загальної оптимізаційної задачі є параметри оптимального режиму роботи для активного споживача. Дана модель дозволяє визначити пріоритетні напрямки роботи для кожного активного

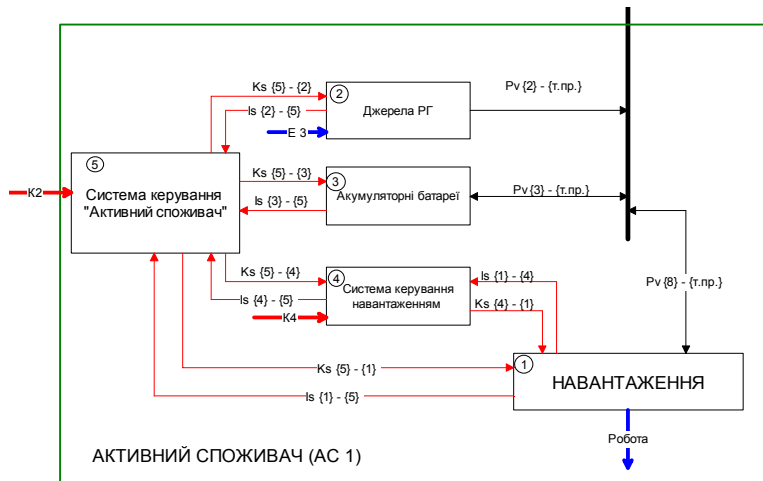


Рисунок – Модель взаємодії активного споживача, де I_s – інформаційний сигнал; K_s – керуючий сигнал; P_v – прямий зв'язок; E – потоки енергії; K – зовнішні керуючі впливи

них складових;

б) вирішення загальної оптимізаційної задачі.

Виконано моделювання взаємодії обладнання активного споживача між собою, взаємодії обладнання активного споживача із його системою керування (рис.) та взаємодії системи керування активного споживача із системним оператором, іншим активним споживачем та власним обладнанням активного споживача.

Висновки

В роботі виконано комплексне дослідження міжнародної нормативної бази із забезпечення вимог щодо впровадження систем Smart Grid. Аналіз показав, що існує близько двохсот стандартів у цій сфері. Визначено ключові стандарти та наголошено на важливості введення в дію цих стандартів в Україні.

Розроблені інформаційні моделі, що дозволяють створити еталонну архітектуру ОЕС України, яка відповідає міжнародним нормам, враховувати всі необхідні аспекти побудови Smart Grid систем і, в свою чергу, дозволяє: покращити взаєморозуміння усіх зацікавлених задіяних сторін; забезпечити практичну реалізацію найбільш прогресивних способів створення інтелектуальних систем; забезпечити сумісність створюваних і вже існуючих компонентів систем; забезпечити цілеспрямоване виконання критично необхідних для реалізації інтелектуальної енергосистеми заходів. До того ж, така еталонна архітектура дозволить в перспективі об'єднати інформаційні архітектури підсистем із відповідними моделями енергосистем європейських країн.

Визначено проблеми та перспективи функціонування, а також фактори впровадження активного споживання в Україні. Сформовано систему механізмів «активізації» споживачів, яка в першу чергу орієнтована на потреби та інтереси споживача. Розроблено алгоритм визначення потенціалу активної поведінки такого споживача електроенергії. Визначені заходи, що забезпечують ефективну взаємодію активних споживачів між собою та із системним оператором. З метою оптимізації режимів роботи обладнання споживача та мережі була створена модель активного споживача. Така модель дозволяє визначити пріоритети для кожного активного споживача, збалансувати вигоди та врахувати можливі вимоги й обмеження які встановлюються оператором системи енергопостачання.

Список літератури

1. Договір про заснування Енергетичного Співтовариства. Набрання чинності від 01.02.2011.
2. Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б.С.Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.

3. Smart Grid Reference Architecture / CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. – 2012. – 107 p.

4. Sergii Denysiuk. Algorithms For Optimal Mode Selection Of Energy Prosumer / Sergii Denysiuk, Taras Baziuk // Conference Proceedings [2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems] (June 2-6, 2014, Kyiv, Ukraine), p. 171–177.

Відомості про авторів

Кириленко Олександр Васильович – д-р техн. наук, професор, акад. НАН України, директор.

Денисюк Сергій Петрович – д-р техн. наук, професор, директор Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУ України «КП».

Танкевич Сергій Євгенійович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу моделювання електроенергетичних об'єктів та систем Інституту електродинаміки НАН України.

Базюк Тарас Миколайович – асистент кафедри електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУ України «КП».

УДК 621.313

І. А. Козакевич

РОЗДІЛЕННЯ ВПЛИВУ АНІЗОТРОПНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ БЕЗДАТЧИКОВОМУ КЕРУВАННІ НА НИЗЬКІЙ КУТОВІЙ ШВИДКОСТІ

ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг

Анотація. Розглянуто побудову систем бездатчикового векторного керування з використанням анізотропних властивостей електричної машини. Представлено систему керування, що базується на використанні високочастотної інжекції у напругу, що живить двигун, та дозволяє виконувати компенсацію впливу паразитних анізотропій. Показано, що визначення положення вісі анізотропії двигуна можливе за рахунок прикладання тестових векторів напруги до статора двигуна або інжектування високочастотної напруги до основної, що живить двигун. Представлено спосіб визначення положення, що передбачає виділення сигналів струмового відгуку за допомогою смугових фільтрів, усунення складових прямої послідовності за рахунок використання фільтрації у синхронній системі відліку з використанням фільтру низької частоти, а також компенсація впливу паразитних анізотропій.

Ключові слова: асинхронний двигун, векторне керування, анізотропна властивість, кутова швидкість, бездатчикове керування, спостерігач стану, динамічні характеристики.

Аннотация. Рассмотрено построение систем бездатчикового векторного управления с использованием анизотропных свойств электрической машины. Представлено систему управления, базирующуюся на использовании высокочастотной инжекции в питающее напряжение и позволяющую выполнять компенсацию влияния паразитных анизотропий. Показано, что определение положения оси анизотропии двигателя возможно с помощью тестовых векторов напряжения, приложенных к статору двигателя, или инжектирования высокочастотного напряжения к основному, питающему двигатель. Представлено способ определения положения, предусматривающего выделение сигналов токового отклика с помощью полосовых фильтров, устранения составляющих прямой последовательности за счет использования фильтрации в синхронной системе отсчета с использованием фильтра низкой частоты, а также компенсации влияния паразитных анизотропий.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, анизотропное свойство, угловая скорость, бездатчиковое управление, наблюдатель состояния, динамические характеристики.

Abstract. We consider the construction of sensorless vector control using anisotropic properties of electric machines. Presented control system based on the use of high-frequency voltage injection that feeds the engine, and allows to perform compensation parasitic anisotropic. It is shown that determining the position of the axis anisotropy engine is possible by applying test vectors stator voltage to the engine or injecting a high-frequency voltage to the main feeding motor. The method of determining the provision for the allocation of current feedback signals using bandpass filters, eliminating direct sequence components by using filtering in the synchronous reference system using low-pass filter, and exposure compensation parasitic anisotropy.

Keywords: induction motor, vector control, anisotropic property, angular velocity, sensorless control, observer, dynamic characteristics.

Вступ

Способи, що використовують базову математичну модель асинхронного двигуна, при бездатчиковому оцінюванні розглядають його як лінійний об'єкт з визначеними параметрами [1-5]. На практиці ці параметри не завжди є відомими, а також можуть змінюватися під час роботи машини [2, 3]. Особливих змін зазнають активні опори статорних та роторних кіл [3], що змінюються при варіаціях температури машини. Крім того, використання базової моделі асинхронного двигуна можливе лише за синусоїдального розподілу обмотки статора, постійної величини повітряного зазору та однорідних властивостей заліза машини. Усі ці припущення не є дійсними в реальній машині. Способи, що не базуються на моделі ідеалізованої машини [6-10], використовують ті анізотропні її властивості, які призводять до виникнення магнітної несиметрії у повітряному зазорі машини. Останні тенденції в бездатчиковому векторному керуванні асинхронними двигунами полягають в використанні інжекції додаткових тестових сигналів [6, 7] для відслідковування положень анізотропії машини. У стандартному перетворювачі частоти вихідна напруга змінної амплітуди та частоти формується інвертором напруги з напруги ланки постійного струму за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Для аналізу режиму роботи двигуна та процесів у ньому достатньо розглядати лише низькочастотні складові вихідної напруги. Тим не менш, ця напруга містить також і високочастотні гармоніки, які генеруються за допомогою ШІМ, які хоча і є небажаними, але неминучими.

Результати дослідження

Найбільш популярним методом, що використовується для оцінки положення асинхронного двигуна за допомогою магнітної анізотропії, є метод інжектування напруги високої частоти в основну напругу, що живить двигун [6-8]. Таким чином, до основного вектора напруги додається вектор постійної амплітуди, що обертається з високою частотою (250–4000 Гц). Цей вектор u описується рівнянням:

$$u_{c\alpha\beta} = U_c e^{j\omega_c t} \quad (1)$$

Вектор струму, що викликається дією тестового вектора напруги, накладається на основний вектор струму. Цей струм відгуку високої частоти виділяється смуговим фільтром з вимірних струмів, а потім демодулюється для відновлення положення потокозчеплення ротора або швидкості. Ті ж вимірні значення струмів використовуються в якості сигналів зворотного зв'язку регуляторів струму системи векторного керування після того, як високочастотна складова струму відфільтровується фільтром низької частоти або смуговим фільтром. На рис. 1 представлена структурна схема системи векторного керування з введенням високочастотного вектора напруги.

Оскільки амплітуда високочастотної напруги, що вводиться у основну напругу, що живить двигун, є постійною величиною, наявність анізотропії машини призводить до появи відповідного струмового відгуку машини. При наявності однієї анізотропії траєкторія руху вектору струму відгуку буде близькою до еліптичної, причому однією з вісей еліпса буде співпадати з положенням анізотропії двигуна, як показано на рис. 2. Вектор високочастотної напруги, що вводиться, при цьому рухається по коловій траєкторії з кутовою частотою ω_c . Оскільки ця кутова швидкість є досить великою у порівнянні з номінальною частотою живлення двигуна, то характер навантаження буде індуктивним, а відставання вектору струму від вектору напруги буде складати близько 90° .

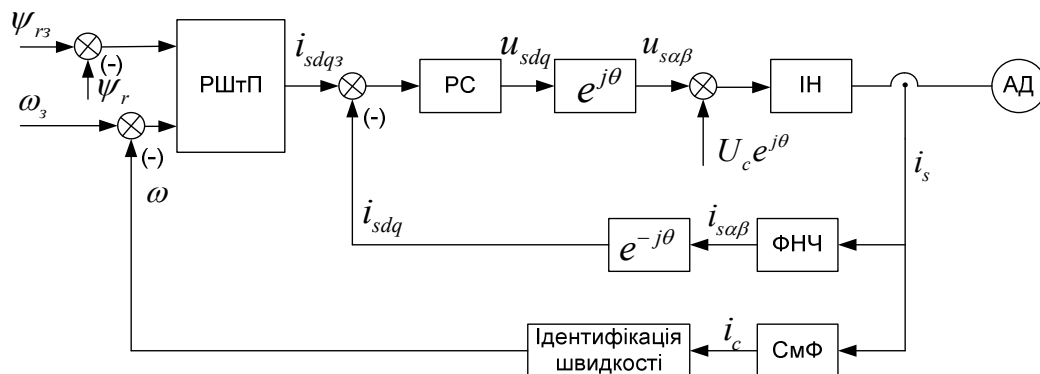


Рисунок 1 – Структура системи векторного керування з введенням високочастотного вектора напруги (ІН – інвертор; РШтП – регулятори швидкості та потокозчеплення; РС – регулятори струму; ФНЧ – фільтр низької частоти; СмФ – смуговий фільтр; АД – асинхронний двигун)

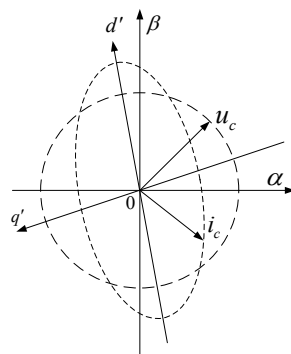


Рисунок 2 – Струмовий відгук на введення високочастотного сигналу напруги

Якщо знехтувати складовою активного опору двигуна, яка є незначною внаслідок суттєвого зростання індуктивної складової при високій частоті напруги живлення, то струмовий відгук можна описати наступним рівнянням:

$$i_{c\alpha\beta} = L_{c\alpha\beta}^{-1} \int (U_c e^{j\omega_c t}) dt \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{L_c^2 + \left(\frac{\Delta L_c}{2}\right)^2} \begin{bmatrix} L_c + \frac{\Delta L_c}{2} \cos(2\theta_{dq'}) & \frac{\Delta L_c}{2} \sin(2\theta_{dq'}) \\ \frac{\Delta L_c}{2} \sin(2\theta_{dq'}) & L_c + \frac{\Delta L_c}{2} \cos(2\theta_{dq'}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega_c t) \\ -\cos(\omega_c t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$i_{c\alpha\beta} = \frac{U_c L_c}{L_c^2 + \left(\frac{\Delta L_c}{2}\right)^2} e^{j\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right)} + \frac{U_c \frac{\Delta L_c}{2}}{L_c^2 + \left(\frac{\Delta L_c}{2}\right)^2} e^{-j\left(\omega_c t - 2\theta_{dq'} - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (4)$$

$$i_{c\alpha\beta} = I_{cp} e^{j\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right)} + I_{cn} e^{-j\left(\omega_c t - 2\theta_{dq'} - \frac{\pi}{2}\right)} \quad (5)$$

де I_{cp} , I_{cn} – амплітуди струмів прямої та зворотної послідовності.

$$I_{cp} = \frac{L_c}{L_c^2 + \left(\frac{\Delta L_c}{2}\right)^2} \frac{U_c}{\omega_c}; I_{cn} = \frac{\frac{\Delta L_c}{2}}{L_c^2 + \left(\frac{\Delta L_c}{2}\right)^2} \frac{U_c}{\omega_c} \quad (6)$$

З рівняння (5) видно, що струм відгуку на високочастотну напругу, що вводиться до основної, складається з двох векторів, що обертаються. Одна складова обертається з тією ж частотою, що й вектор введеної напруги та у тому ж напрямку, а друга складова – у зворотному напрямку до вектору напруги. Таким чином, I_{cp} складовою прямої послідовності, не містить інформації щодо просторового розміщення вісі анізотропії, а I_{cn} – складовою зворотної послідовності, що містить просторову інформацію у своїй фазі та є пропорційною до індуктивності, що модулюється анізотропією.

Отже, перед визначенням просторової інформації щодо вісі анізотропії слід відфільтрувати складову прямої послідовності у струмовому відгуці системи. Оскільки вектори складових прямої та зворотної послідовностей обертаються в протилежних напрямках, то одним з варіантів усунення прямої складової є застосування високочастотного фільтру у системі координат, що обертається синхронно з складовою прямої послідовності несучого тестового сигналу.

Представлений спосіб є актуальним для умов, що в машині є одна виражена синусоїдально розподілена анізотропія. Але на практиці відсоток електричних машин з такими умовами, хоча і не є дуже низьким, проте є значна вірогідність того, що анізотропна властивість є не однією. Нелінійні властивості сталі машини, дискретна природа обмоток машини та інші конструктивні особливості призводять до появи вторинних та паразитних анізотропій. До них відносяться ексцентриситет ротора, насичення сталі машини, наявність дискретних пазів на статорі та роторі і т.д. Ці анізотропні властивості не обов'язково мають період, рівний полюсному кроку машини. Отже, машини, що мають більше ніж одну виражену анізотропію або несинусоїдально розподілену анізотропію, можуть бути описані з використанням принципу суперпозиції, як сума окремих анізотропій, розкладених у ряд Фур'є. За умови симетричного трифазного живлення струм двигуна можна записати так:

$$i_{c\alpha\beta} = I_{cp} e^{j\left(\omega_c t - \frac{\pi}{2}\right)} + \sum_{i=1}^n I_{cni} e^{-j\left(\omega_c t - 2k_i \theta_{dq'} - \frac{\pi}{2} + \varphi_i\right)} \quad (7)$$

де I_{cni} – амплітуда i -ї складової зворотної послідовності;

k_i – номер гармоніки анізотропії, що створює i -у складову;

$\theta_{dq'}$ – кутове положення анізотропії, що створює i -у складову;

φ_i – початковий фазовий зсув i -ї складової по відношенню до системи відліку.

Амплітуди складових прямої та зворотної послідовності можуть бути знайдені так:

$$I_{cp} = \frac{\sum L_c}{\sum L_c^2 + \sum \left(\frac{\Delta L_c}{2}\right)^2} \frac{U_c}{\omega_c}; I_{cn} = \frac{\sum \frac{\Delta L_c}{2}}{\sum L_c^2 + \sum \left(\frac{\Delta L_c}{2}\right)^2} \frac{U_c}{\omega_c} \quad (8)$$

де ΔL_{ci} – індуктивність, що модулюється i -ю анізотропією.

Як і у випадку наявності однієї анізотропії, струмовий відгук високочастотного тестового сигналу містить складові прямої та зворотної послідовностей, причому складова прямої послідовності не містить інформації щодо просторового розміщення вісі анізотропії та є пропорційною до середньої перехідної індуктивності статора. Складові зворотної послідовності містять просторову інформацію, що створена кожною окремою анізотропією, а амплітуди окремих складових зворотної послідовності пропорційні до величини перехідних індуктивностей, що створюються цими анізотропіями. При цьому представлений математичний опис є універсальним і дозволяє застосування як до статичних анізотропій, так і до анізотропій, вісі яких обертаються синхронно з ротором або полем машини. У випадку статичної анізотропії кут повороту її вісі є незмінним, отже $k_i=0$.

На рис. 3 представлена структурна схема системи бездатчикового визначення положення ротора асинхронного двигуна. Визначення положення анізотропії після усіх вищеописаних процедур фільтрації виконується за допомогою фазодетектора $\Delta\Phi$, контурного фільтру $W1(p)$ та керований генератор, що у даному випадку представлений інтегратором. На виході фазодетектора скалярної системи фазового автопідстроювання частоти, що була описана раніше, присутні низькочастотна та високочастотна складові. При цьому лише перша складова містить фазову різницю між вхідним сигналом та оцінкою фази, що дозволяє налаштувати контур. Високочастотна складова відфільтровується фільтром низької частоти, що містить у $W1(p)$. Цей фільтр низької частоти створює проблеми при реверсуванні швидкості та при роботі на дуже низькій кутовій частоті, оскільки високочастотна складова зміщується в низькочастотну зону та не може бути усунена. Це призводить до порушень у роботі системи фазового автопідстроювання частоти через неможливість визначення фазової різниці.

Застосування системи фазового автопідстроювання у векторній формі дозволяє усунути дану проблему через те, що використовуються два ортогональних сигнали, що містять фазову інформацію. Припустимо, що на вхід системи діють ідеально відфільтровані сигнали зворотної послідовності:

$$i_{c1d} = I \sin(\theta_r); \quad (9)$$

$$i_{c2d} = I \sin(\theta_r), \quad (10)$$

де θ – кут анізотропії.

Коефіцієнт n показує співвідношення між кутом повороту ротора в геометричних градусах та кутом повороту анізотропії, що розглядається, тобто:

$$\theta_r = n \theta_{dq'} \quad (11)$$

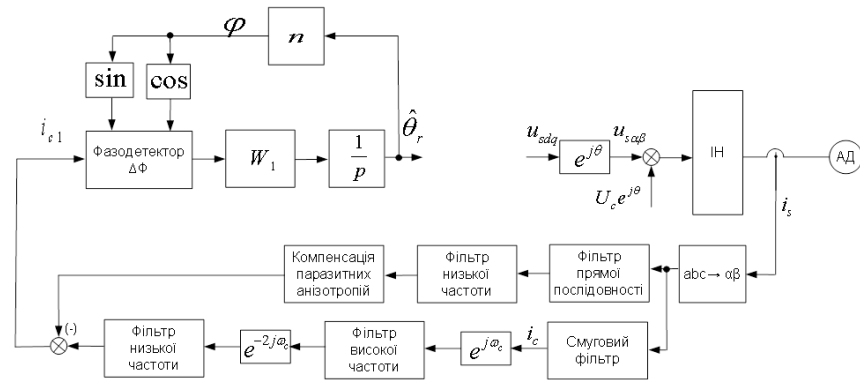


Рисунок 3 – Структура системи бездатчикового визначення положення з використанням анізотропних властивостей асинхронного двигуна за допомогою високочастотної інжекції

Фазодетектор виконує векторне множення вхідного вектору та вектору одиничної величини, аргументом якого є отримана оцінка положення з виходу спостерігача:

$$\Delta \hat{\theta} = i_{c1d} \cos \hat{\theta}_r - i_{c1q} \sin \hat{\theta}_r = I \sin(\theta_r - \hat{\theta}_r) \quad (11)$$

За умови $\theta_r - \hat{\theta}_r \rightarrow 0$:

$$\Delta \hat{\theta} \approx I(\theta_r - \hat{\theta}_r) \quad (12)$$

Єдиною відмінністю між скалярною та векторною формами системи фазового автопідстроювання частоти є відсутність високочастотної складової та необхідності використання фільтра низької частоти.

В якості контурного фільтра допустимо використовувати пропорційну ланку або пропорційно-інтегральну. Включення коефіцієнту ну зворотний зв'язок забезпечує відповідність вихідного сигналу інтегратора положенню ротора у геометричних градусах, тобто виконання масштабування сигналів положення. В той же час, це призводить до того, що даний алгоритм не може визначити абсолютне положення з інкрементального сигналу без застосування інтегральних виразів.

Висновки

Асинхронний двигун має низку анізотропних властивостей, що можуть бути визначені для бездатчикового оцінювання кутової швидкості та потокозчеплення. Виявлення положення вісі анізотропії двигуна можливе за рахунок прикладання тестових векторів напруги до статора двигуна або інжектування високочастотної напруги до основної, що живить двигун. При цьому аналізується струмовий відгук на цей вплив, причому інформація щодо просторового розміщення вісі анізотропії знаходиться у фазі складової зворотної послідовності. Представлено спосіб визначення положення, що передбачає виділення сигналів струмового відгуку за допомогою смугових фільтрів, усунення складових прямої послідовності за рахунок використання фільтрації у синхронній системі відліку з використанням фільтра низької частоти, а також компенсація впливу паразитних анізотропій.

Список літератури

1. Пересада С.М. Семейство алгоритмов обработки момента-потока асинхронного двигателя при косвенной ориентации по вектору потокозчепления статора [Електронний ресурс] / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, А.Ю. Онанко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 25–27. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/etks_2011_3_8.pdf
2. Пересада С.М. Обґрунтування структури спостерігача, інваріантного до варіацій активного опору ротора. [Електронний ресурс] / С.М. Пересада, В.М. Трандафілов. //Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014. – Вип. 1. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNTUV_2014_1_7.pdf
3. Пересада С. М. Метод синтеза инвариантных к вариациям активного сопротивления ротора алгоритмов прямого векторного управления асинхронным двигателем / С.М. Пересада, В.Н. Трандафилов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – 2013. – №36 (1009). – С. 59–63.

4. Пересада С. М. Метод синтеза и робастность наблюдателей потокосцепления асинхронного двигателя, работающих в скользких режимах / С.М. Пересада, В.Н. Трандафилов // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск науково-виробничого журналу «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»*. – 2012. – № 3 (19). – С. 40–44.

5. Пересада С. М. Робастность алгоритмов косвенного векторного управления асинхронными двигателями к вариациям активного сопротивления ротора / С. М. Пересада, В. С. Бовкунович // *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. – 2011. – № 11 (186). – С. 296–300.

6. Degner M.W. Flux, position and velocity estimation in AC machines using carrier signal injection // *University of Wisconsin-Madison*, 1998.

7. Teske N., Asher G.M., Sumner M., Bradley K.J. Suppression of saturation effects for the sensorless position control of induction motor drives under loaded conditions // *IEEE Transactions on industrial electronics*. – 2000. – pp. 1142–1150.

8. Wolbank T.M., Metwally M.K. Separation of saliency components for speed sensorless detection of flux and rotor position of induction machines // *2008 18th International Conference on electrical machines*. – 2008. – pp. 1–6.

9. Wolbank T.M., Metwally M.K. Sensorless position control of skewed rotor induction machines based on multi saliency extraction // *2010 Twenty-fifth annual IEEE Applied power electronics conference and exposition*. – 2010. – pp. 414–419.

10. Mingardi D., Bianchi N., Fornasiero E., Alberti L. Induction motor with an intentionally created saliency for sensorless applications // *2013 39th Annual conference of the IEEE Industrial electronics society*. – 2013. – pp. 2929–2934.

Відомості про авторів

Козакевич Ігор Аркадійович – старший викладач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті, e-mail: aepigor@gmail.com

УДК 621.331: 621.311.4

О. О. Матусевич

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПІДВИЩЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка
В. Лазаряна, м. Дніпропетровськ

Анотація. Розроблено модель удосконалення системи управління ремонтним обслуговуванням тягової підстанції дистанції електропостачання, що дозволяє підвищити ефективність системи організації і керування технічним обслуговуванням та ремонтом силового електрообладнання тягової підстанції за рахунок посилення таких функцій управління як: планування, прогнозування, облік, контроль, мотивація і стимулювання ремонтних бригад та прийняття оптимальних рішень. Показано, що реалізація моделі дозволить істотно скоротити витрати на технічне обслуговування і ремонти обладнання, знизити тривалість його простоїв і, в підсумку, підвищити надійність та ефективність роботи тягової підстанції дистанції електропостачання залізниць.

Ключові слова: тягова підстанція, технічне обслуговування і ремонт, система управління, силове електрообладнання, моделювання.

Аннотация. Разработана модель усовершенствования системы управления ремонтным обслуживанием тяговой подстанции дистанции электроснабжения, что позволяет повысить эффективность системы организации и управления техническим обслуживанием и ремонтом силового электрооборудования тяговой подстанции за счет усиления таких функций управления как: планирование, прогнозирование, учет, контроль, мотивация и стимулирование ремонтных бригад и принятие оптимальных решений. Показано, что реализация модели позволит существенно сократить время на техническое обслуживание и ремонты оборудования, снизить продолжительность его простоев, повысить надежность и эффективность работы тяговой подстанции дистанции электроснабжения железной дороги.

Ключевые слова: тяговая подстанция, техническое обслуживание и ремонт, система управления, силовое электрооборудование, ремонтные бригады, моделирование.

Abstract. The model management system improvement the repair service of traction substation the distance of power, which improves the efficiency of the organization and management of maintenance and repair of power electric traction substation by strengthening such control functions as: planning, forecasting, accounting, control, motivation and stimulation of repair crews and optimal decision making. It is shown that the implementation of the model will significantly reduce the cost of maintenance and repair of equipment, reduce the duration of his downtime and, ultimately, improve the reliability and efficiency of electrical traction substation distance railways.

Keywords: traction substation, maintenance and repair, control system, power equipment, maintenance crews, modeling.

Вступ

У існуючих умовах роботи дистанцій електропостачання залізниць України зростає економічна цільність створення сучасної системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) основного силового електрообладнання тягових підстанцій (ТП). Однією з основних особливостей сучасних складних технічних систем (у тому числі системи ТО і Р силового електрообладнання ТП електрифікованих залізниць) є те, що параметри і структури систем на різних етапах життєвого циклу технічного обладнання змінюються під дією об'єктивних і суб'єктивних причин. У цих умовах для підвищення (збереження) необхідного рівня працездатності силового електрообладнання ТП і можливостей системи ТО і Р, необхідно здійснювати управління її структурами (у тому числі управління реконфігурацією структур) [1, 2].

Завдання управління структурною динамікою системи за своїм змістом відносяться до класу завдань структурно-функціонального синтезу складних технічних систем, формування і реалізації відповідних програм управління їх розвитком. На сьогодні даний клас завдань структурно-функціонального синтезу і управління розвитком систем досліджений недостатньо повно. Отримані нові наукові і практичні результати у рамках наступних напрямів досліджень [3-5]:

- синтез технічної структури складних систем;
- синтез функціональної структури складних систем;
- синтез програм створення і розвитку нових поколінь складних систем без урахування етапу спільного функціонування існуючої і впроваджуваної системи;
- одночасний синтез як технічної, так і функціональної структур.

На цей час виконаний значний обсяг наукових робіт, присвячених вирішенню проблеми синтезу структур складних технічних систем різних класів. При цьому узагальнене завдання синтезу (вибору) структури (або структур) складних систем зводиться, як правило, до постановки і вирішення наступної оптимізаційної задачі:

$$\bar{S}\{\{\bar{f} \subset \bar{F}(\bar{p} \subset \bar{P})\}\bar{R}[\bar{m} \subset \bar{M}]\} \rightarrow extr$$

де \bar{P} – безліч можливих принципів і алгоритмів управління $(\bar{p} \subset \bar{P})$, використовуваних при формуванні виду системи або її елементів;

\bar{F} – безліч взаємозв'язаних функцій (завдань, операцій), що виконуються системою.

Кожному набору принципів і алгоритмів управління \bar{P} відповідає безліч функцій $\bar{F}(\bar{p} \subset \bar{P})$, з яких при проектуванні системи необхідно вибрати підмножину, достатню для реалізації вибраних принципів управління, тобто вибрати $\bar{f} \subset \bar{F}(\bar{p} \subset \bar{P})$; \bar{M} – безліч можливих взаємозв'язаних процесів (елементів) складної системи. Подібними елементами стосовно складної системи ТО і Р ТП можуть бути засоби діагностування, виміру, реєстрації, обліку, прийому, передачі і обробки інформації, пункти обслуговування і управління і тому подібне; \bar{R} – операція відображення елементів безлічі \bar{F} на елементи безлічі \bar{M} . В цьому випадку це оптимальне відображення повинне забезпечувати екстремум деякої (або деяких) цільової функції \bar{S} при виконанні заданих обмежень.

Подальше узагальнення даного завдання синтезу проводиться у напрямі урахування чинників невизначеності, викликаних експлуатацією обладнання, дією зовнішнього середовища, а також в напрямі, пов'язаному з постановкою і вирішенням багатокритеріальних завдань вибору оптимальних структур системи управління ТО і Р силового електрообладнання ТП.

Метою роботи є розробка ефективної моделі управління системою ТО і Р ТП дистанції електропостачання електрифікованої залізниці.

Результати дослідження

Ефективне управління системою ТО і Р обладнання ТП ставить ряд комплексних проблем. Поряд з моделюванням технологічних процесів актуальні також питання аналізу організації системи ТО і Р, сервісних послуг, удосконалення інформаційного забезпечення діяльності ремонтних бригад, управління кадровим потенціалом і т.п. Одним з стратегічних напрямів підвищення якості системи організації та керування ремонтом силового електрообладнання ТП є розробка концептуальної моделі управління системою ТО і Р ТП, що дозволяє підвищити ефективність системи організації та керування ТО і Р за рахунок посилення таких першочергових функцій керування як: прогнозування і планування, удосконалення інформаційного забезпечення, оцінка якості проведення ТО і Р, визначення цільової функції параметра обладнання, облік та контроль, мотивація і стимулювання, зміцнення кадрового потенціалу, тощо.

Виходячи із загальних форм системи організації та керування технічного обслуговування і ремонту ТП [6-8], можна виділити ряд принципових напрямів удосконалення діяльності ремонтних бригад, які здійснюють ТО і Р обладнання:

- застосування сучасних моделей прогнозування відмов та оцінки технічного стану обладнання;
- забезпечення ефективного планування термінів ТО і Р;
- удосконалення інформаційного забезпечення діяльності ремонтних бригад, що дозволяє в будь-який момент мати повну інформацію про стан устаткування (про необхідні обсяги, терміни виконання ремонтних робіт та їх вартості) та приймати ефективні рішення з організації ТО і Р;
- визначення цільової функції (критерію оптимальності) найбільш важливого параметра обладнання;
- якісний аналіз ТО і Р силового електрообладнання ТП та сервісних послуг;
- удосконалення механізму мотивації та стимулювання працівників ремонтних бригад, з метою забезпечення ув'язки результатів їхньої праці з системою бюджетування і з кінцевими результатами роботи підприємства;
- управління кадровим потенціалом і т.п.

З урахуванням [1-9] та розглянутих загальних форм системи організації ремонтів, принципових напрямів удосконалення діяльності ремонтних бригад ТП та стратегічних напрямів підвищення якості системи організації та керування ТО і Р силового електрообладнання ТП, можна запропонувати концептуальну модель підвищення ефективності керування системою ТО і Р ТП електрифікованих залізниць (рис. 1).

Підвищення ефективності організації та керування технічним обслуговуванням і ремонтом обладнання ТП системи тягового електропостачання може бути досягнуто за рахунок посилення дієвості основних функцій керування: облік і контроль, оцінка технічного стану, планування і прогнозування, мотивація і стимулювання (рис. 1).

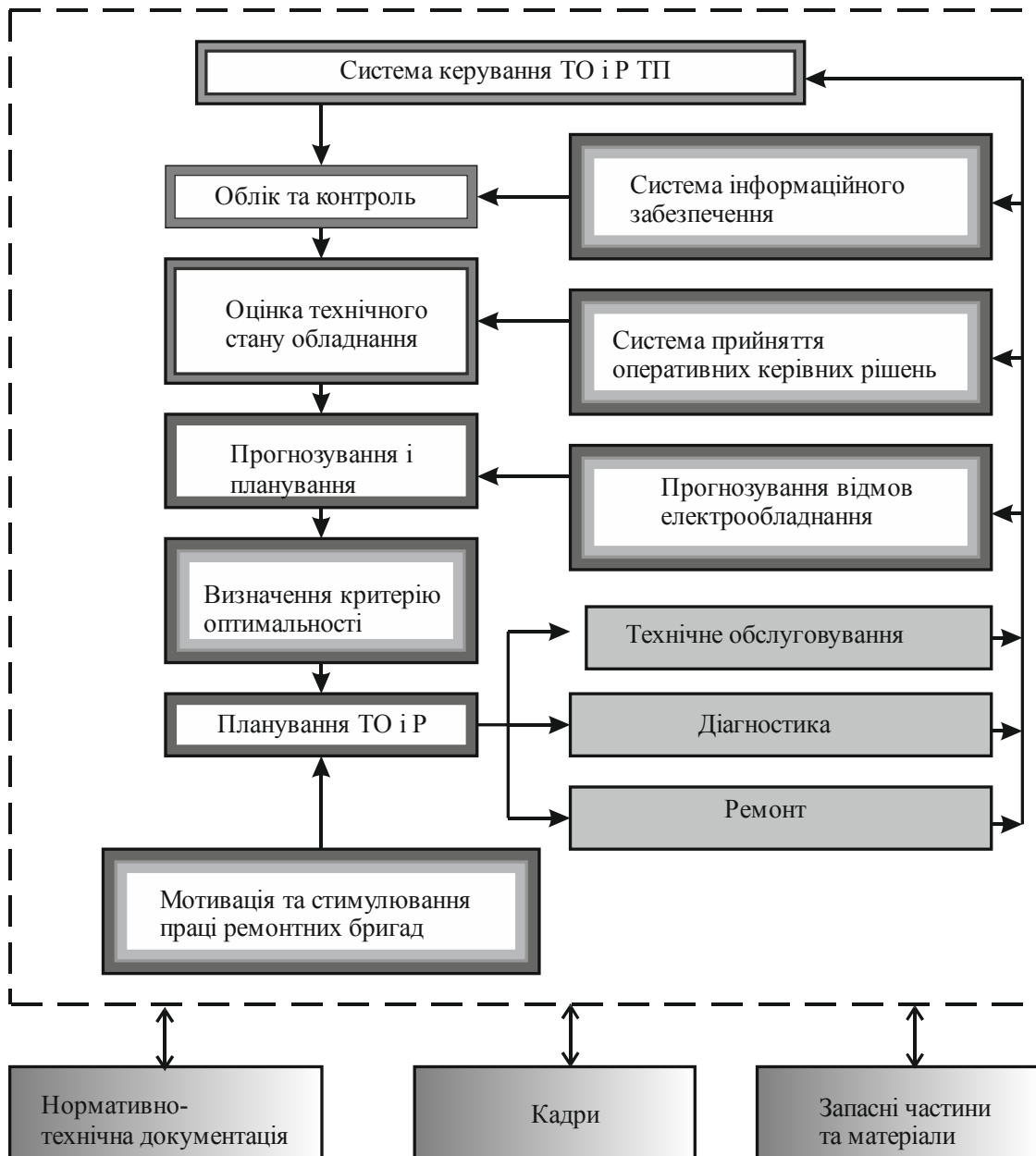


Рисунок 1 – Концептуальна модель удосконалення системи управління ТО і Р обладнання ТП

Облік і контроль реалізуються шляхом формування ефективної системи інформаційного забезпечення організації ТО і Р ТП (рис. 1). Дана система повинна функціонувати шляхом використання баз даних, в яких буде накопичуватися інформація про кожну технологічну одиницю обладнання. Такий підхід дозволить мати повну інформацію про стан обладнання, планувати ТО і Р, скорочувати витрати на ремонт, звітувати тощо.

Подальше вдосконалення інформаційного забезпечення діяльності ремонтних бригад ТП можливе шляхом розробки інтелектуальних модулів: модулі бази даних (БД), модулі капітального ремонту (КР), модулі поточного ремонту (ПР), модуль технічного обслуговування (ТО) (рис. 2).

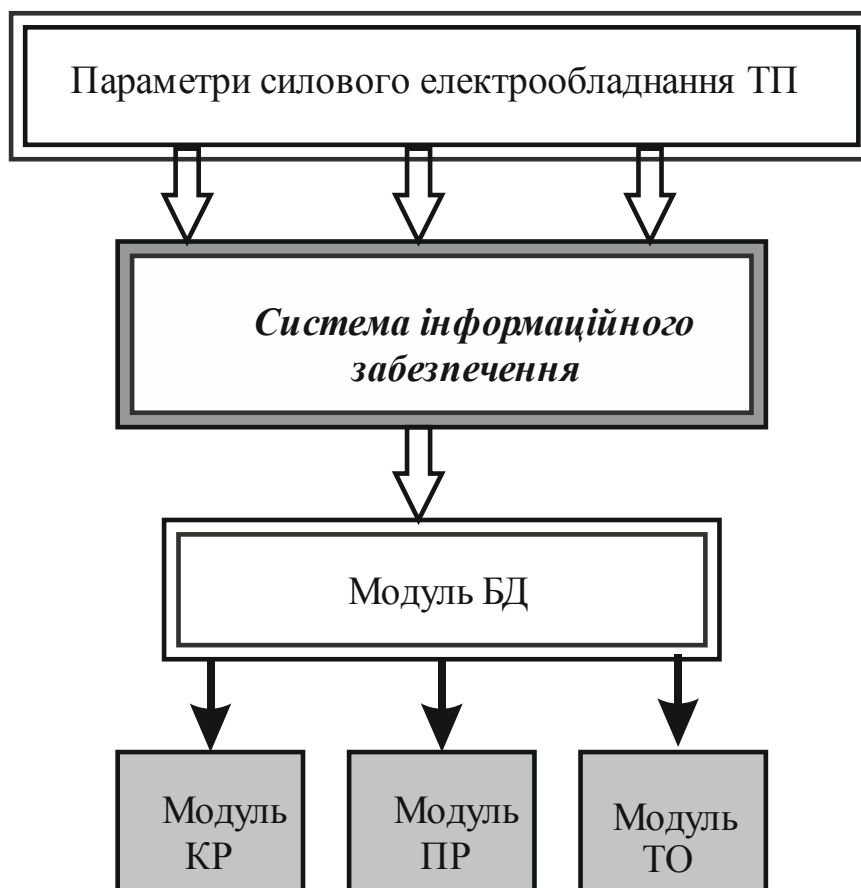


Рисунок 2 – Система інформаційного забезпечення

На вхід інформаційної системи надходять дані параметрів силового електрообладнання ТП, з виходу знімається інформація про необхідні заходи з організації ТО і Р (ремонтні графіки, денні завдання на обслуговування, ремонт, тощо).

Модуль бази даних містить інформацію про структуру бази та можливості доступу до неї за допомогою системи управління базами даних.

Модуль капітального ремонту включає в себе інформацію про особливості та порядок проведення робіт з капітального ремонту силового електрообладнання ТП, вимоги до технології та організації робіт, а також до якості ремонту.

Модулі поточного ремонту та технічного обслуговування мають аналогічну структуру (враховують особливості кожного з видів технічного обслуговування і ремонту) і функціональну спрямованість.

Модульна структура системи інформаційного забезпечення є основою колективного управління потоками інформації та надає керівництву ТП матеріали для прийняття управлінських рішень у вигляді аналітичних звітів. Завдяки використанню такої інформаційної системи керівництво ТП може володіти в будь-який момент повною інформацією про стан устаткування, про необхідних ремонтних роботах і про їх вартість.

Правильна організація оперативного-технічного обліку та звітності сприяє своєчасному і раціональному ремонту устаткування а, відтак, збільшення тривалості його ремонтного циклу і терміну експлуатації на основі оцінки технічного стану обладнання.

Оцінка технічного стану обладнання обумовлює необхідність побудови системи прийняття оперативних управлінських рішень (СПОУР), яка дозволить визначати моменти часу проведення діагностики, технічного обслуговування або ремонтів силового електрообладнання ТП на основі безперервної або дискретної інформації про його технічний стан (ТС) при різних режимах роботи. Для вирішення цієї задачі можна запропонувати модель СПОУР для експлуатації силового електрообладнання ТП (рис. 3).

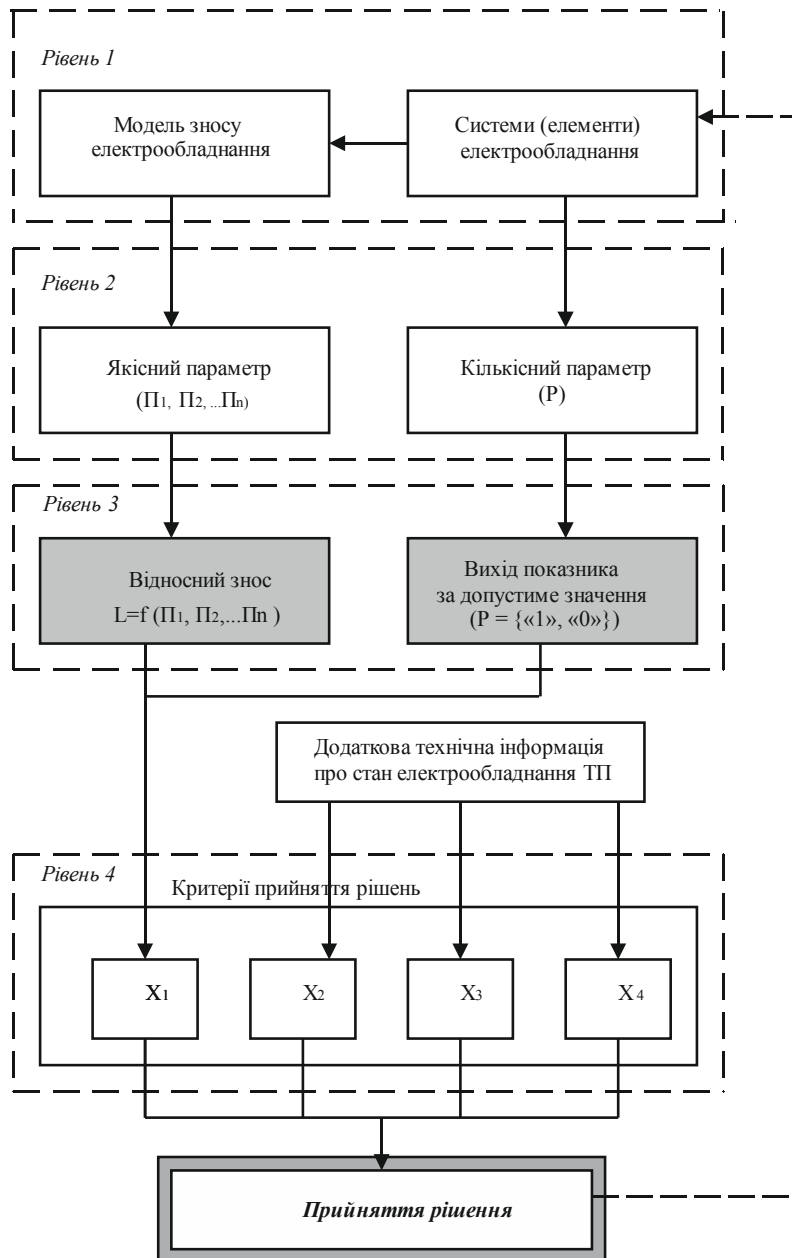


Рисунок 3 – Модель системи прийняття оперативних управлінських рішень

При цьому основними критеріями прийняття рішень можна розглядати: X₁ – технічний стан силового електрообладнання ТП; X₂ – стійкість системи до зовнішніх впливів (здатність резервування елементів системи); X₃ – передана потужність як продукт виробничої діяльності ТП; X₄ – час відновлення електрообладнання.

Завершальним етапом формування системи прийняття оперативних управлінських рішень є розробка алгоритму ухвалення рішень який визначає послідовність дій при формуванні стратегії експлуатації силового електрообладнання ТП по фактичному технічному стану [8].

Планування і прогнозування ремонту силового електрообладнання пропонується здійснювати на основі імітаційної моделі організації ремонтних робіт на ТП. Реалізація моделі забезпечує оптимізацію витрат на кількісний склад ремонтних бригад і зменшення втрат від простоїв устаткування.

Мотивація та стимулювання праці персоналу ремонтної служби дистанції електропостачання повинні здійснюватися шляхом формування відповідної системи, у рамках якої, зокрема, передбачається облік міри участі кожного працівника.

Підвищенню відповідальності працівників ремонтної служби за економне використання фінансових коштів, необхідних для її нормального функціонування, сприяє система бюджетування, що передбачає

визначення кошторису витрат (бюджет) служби, необхідних для виконання покладених на неї функцій, контроль і аналіз виконання запланованих показників:

- об'єм ремонтних робіт і робіт по технічному обслуговуванню устаткування;
- витрати на матеріали і зарплату технічного персоналу;
- витрати на склад служби технічного обслуговування і ремонту (зарплата працівників відділу, витрати на відрядження та проведення дослідно-конструкторських робіт і дослідницьких робіт по ремонту і модернізації);
- витрати на виконання монтажних робіт, тощо.

Результати досліджень інших складових моделі удосконалення системи управління ТО і Р обладнання ТП (рис. 1) а це, прогнозування відмов силового електрообладнання ТП, визначення критерію оптимальності ТО і Р, а також практичне застосування запропонованої концептуальної моделі вдосконалення системи ТО і Р ТП дистанцій електропостачання залізниць будуть опубліковані в наступних статтях.

Висновки

Обгрунтовано доцільність розгляду процесу управління ремонтними роботами на ТП дистанції електропостачання залізниць на основі системного підходу. Запропонована концептуальна модель управління ремонтним обслуговуванням силового електрообладнання ТП дистанції електропостачання залізниць. Основні складові розробленої моделі удосконалення системи управління ремонтним обслуговуванням тягової підстанції дозволяють підвищити ефективність системи організації та управління технічним обслуговуванням та ремонтом силового електрообладнання тягової підстанції. Реалізація моделі дозволить істотно скоротити витрати на технічне обслуговування і ремонти обладнання, знизити тривалість його простоїв і, в підсумку, підвищити надійність та ефективність роботи ТП дистанції електропостачання залізниць.

Список літератури

1. Землянов В.Б. Интегрированная система управления электроснабжением железнодорожного транспорта / В.Б.Землянов, А.Н.Пшинько, В.Т.Доманский, В.В. Скалозуб // «УЖЕЛ»: Proc. 7th International Scientific Conference of Railway Experts, Yugoslavia, Vrnjaska Banja, October 4-6, 2000. – Vrnjaska Banja, 2000. – S. 65–68.
2. Дюбановский С.А. Системы автоматического управления с реконфигурацией / С.А. Дюбановский, Н.А. Озерянный // Измерение, контроль, автоматизация. – 1990. – № 4(76). – С. 62–80.
3. Eds. M.M. Gupta Intelligent Control Systems: Theory and Applications / Eds. M.M. Gupta, N.K. Sinka. – N.Y.: IEEE Press Publ. – 1996.
4. Athaus M. Optimal control: An Introduction to the Theory and Its Applications / M. Athaus, P. Falb. – New York, San Francisco, Sidney, McGraw-Hill Book Company Publ. – 1966.
5. Герасимчук В.Г. Стратегическое управление предприятием: графическое моделирование: Учебное пособие. / В. Г. Герасимчук. – М. : Финансы, 2000. – 457 с.
6. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць. – К. : Державна адміністрація залізничного транспорту України Укрзалізниця, 2013. – 27 с.
7. Матусевич О.О. Сучасні підходи з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць на основі SMART технологій / О. О. Матусевич // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2014. – № 4 (52). – С. 75–85.
8. Матусевич О.О. Удосконалення методології системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія / О. О. Матусевич. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2015. – 295 с.
9. Крушельницкая А.В. Управление материальными ресурсами / А.В. Крушельницкая. – К. : Кондор, 2007. – 162 с.

Відомості про авторів

Матусевич Олександр Олександрович – к-т техн. наук, доцент, доцент кафедри електропостачання залізниць.

УДК 621.396

В. С. Смирнов¹, А. В. Самков², Е. В. Иванченко¹, Н. В. Беленок¹

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СТРУКТУРНО-ИНВАРИАНТНЫХ УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

¹Государственный университет телекоммуникаций МОН Украины, г. Киев²Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

Аннотация. Рассмотрены принципы построения инвариантных усилительно-преобразовательных систем телекоммуникационного оборудования автономных объектов. Сформулированы основные положения структурной инвариантности систем, позволяющие синтезировать адаптивные усилительно-преобразовательные системы с многократной модуляцией и нечетким управлением. Показано, что способность нечеткого регулятора реализовать сложную нелинейную зависимость адаптивного воздействия от значений вектора ошибки дает возможность как для выбора наилучшего в смысле скорости сходимости процесса адаптации при минимальном показателе отклонения от эталонного движения алгоритма адаптации, так и для расширения диапазона адаптации.

Ключевые слова: усилительно-преобразовательная система, инфокоммуникационное оборудование, автономные объекты, теория инвариантности, система автономного управления, нечеткая логика.

Анотація. Розглянуто принципи побудови інваріантних підсилювально-перетворювальних систем інфокомунікаційного обладнання автономних об'єктів. Сформульовано основні положення структурної інваріантності систем, що дають змогу синтезувати адаптивні підсилювально-перетворювальні системи з багаторазовою модуляцією і нечітким управлінням. Показано, що здатність нечіткого регулятора реалізувати складну нелінійну залежність адаптивного впливу від значень вектора похибки дає можливість як для вибору найкращого в сенсі швидкості збіжності процесу адаптації при мінімальному показнику відхилення від еталонного руху алгоритму адаптації, так і для розширення діапазону адаптації.

Ключові слова: підсилювально-перетворювальна система, інфокомунікаційне обладнання, автономні об'єкти, теорія інваріантності, система автономного управління, нечітка логіка.

Abstract. The thesis is devoted to the development of the construction theory invariant amplify-converter systems with a multiple modulation. The principle of organization and control algorithms of adaptive amplify-converter systems are proposed and researched. It is shown that the ability of a fuzzy controller to implement complex nonlinear dependence of the adaptive effects of the error vector values allows for selection of the best in terms of the convergence of the adaptation process at the minimum speed indicator of deviation from the reference motion adaptation algorithm, and to expand the range of adaptation.

Key words: amplify-converting systems, infocommunication equipment, autonomus objects, theory of invariante, system independent control, fuzzy logic.

Вступление

Современный уровень развития радиотехнических систем непосредственно связан с проблемой создания функционально и энергетически эффективного электронного оборудования. В связи с развитием микроэлектроники и полупроводниковой техники эта проблема приобретает особое значение. Это относится и к усилительно-преобразовательным системам (УПС), входящим в состав разнообразного инфокоммуникационного оборудования (ИКО).

Современный уровень развития аппаратных средств ИКО, постоянно возрастающие требования, предъявляемые к ним, требуют разработки УПС, которые сочетали бы в себе функции формирования высококачественного выходного сигнала и широкодиапазонного регулирования (стабилизации) его параметров, обеспечивая тем самым высокие энергетические и динамические показатели. Необходимость в таких УПС ощущается при разработке и создании различных систем воспроизведения и усиления информации, телеуправляемых автономных аэрокосмических и глубоководных комплексов, в частности, беспилотных и космических аппаратов, автоматических зондов, робототехнических комплексов, автоматизированных систем телекоммуникаций, радионавигации и гидроакустики, используемых в оборудовании автономных объектов (АО).

То несоответствие, которое регулярно обнаруживается между характеристиками УПС и непрерывно растущими требованиями, предъявляемыми к ним, является мощным и постоянно действующим стимулятором совершенствования УПС. При этом рост информационной пропускной способности сопровождается как расширением функциональных возможностей УПС, так и увеличением энергозатрат. Кроме того, современные УПС работают обычно в составе комплексов и, следовательно, должны удовлетворять условиям, предъявляемым к комплексу, например, условию электромагнитной совместимости.

Такие УПС могут иметь большое количество потребителей, потому необходимость работы УПС по заданной циклограмме, возможность перестройки структуры УПС, синхронизации ее работы существенно отличают УПС от известных систем, для которых последовательность смены режимов работы и специальные требования к характеристикам обычно не регламентируются. Следовательно, речь идет о самонастраивающихся многорежимных УПС [1, 2].

Материалы исследований

Эффективным средством обеспечения заданных характеристик УПС является использование положений теории инвариантности [2]. Однако использование теории инвариантности при построении УПС модуляционного типа осложняется нелинейностью дискретных систем автоматического управления, какими являются современные УПС.

Основная задача теории инвариантности – отыскание таких условий структурного построения УПС, при выполнении которых движение одной или нескольких координат системы не зависит от одного или больше числа входных воздействий, подаваемых на систему. Наиболее интересны два случая:

- входные воздействия поддаются непосредственному измерению, но законы их изменения во времени заранее неизвестны. В этом случае структура системы должна обеспечить независимость движения координат при любом допустимом изменении входных воздействий;

- входные воздействия непосредственно измерить невозможно. В этом случае структура системы должна обеспечить независимость движения координат при любом допустимом входном воздействии. По крайней мере, эта независимость должна выполняться с определенной степенью точности, т.е. инвариантность до ε .

На сегодня не решены многие вопросы теоретического и практического характера, связанные с созданием структурно-инвариантных УПС. Кроме того, актуальной проблемой является обеспечение заданных характеристик при априорной неполноте или отсутствии информации о координатно-параметрических воздействиях на систему, что приводит к необходимости использования адаптивного подхода [1].

Широкое использование робототехнических систем требует повышения гибкости УПС и надежности (отказоустойчивости и живучести) подобного рода комплексов. Повышение указанных показателей и качества принимаемых решений за счет усовершенствования только аппаратного обеспечения структур УПС на определенном этапе существенно повысило уровень автоматизации различного рода технологических параметров. Анализ результатов использования таких комплексов в системах с повышенной степенью ответственности указал на существование пределов возможных уровней достижимости данных показателей при схематехнической реализации. Например, повышение функциональных возможностей УПС за счет усложнения аппаратурной реализации приводит к снижению отказоустойчивости и живучести системы в целом. Поэтому одним из возможных направлений решения этой проблемы является снижение уровня сложности реализации программно-аппаратурного обеспечения используемых УПС за счет повышения их «интеллектуальности» [3].

При этом к УПС предъявляется требование реализации заданных характеристик функционирования при условии наиболее полного обеспечения инвариантности выходных координат системы к процессам в первичных источниках энергии и потребителях. Реализация заданных характеристик функционирования предусматривает инвариантность выходных координат УПС не только к возмущающим воздействиям, но и к виду преобразуемой электроэнергии, что обуславливает необходимость расширения функциональных и динамических возможностей систем. Отсутствие единого методологического подхода к построению и анализу инвариантных УПС с заданными характеристиками функционирования значительно осложняет задачу их создания и не позволяет обеспечить реализацию требований, которые предъявляются к таким системам.

Динамический подход к описанию систем самого различного происхождения является основой анализа большинства классических явлений. Сначала строится соответствующая математическая модель в виде динамических уравнений, а затем тем или иным способом изучаются их решения, которые можно сопоставить с экспериментальными данными. Развитие этих идей, а также представление, что состояние модели в любой момент времени должно однозначно определяться начальными условиями, привели исследователей к понятию динамической системы.

Хотя динамическая система и является некоторой математической абстракцией, такая парадигма оказалась весьма продуктивным инструментом при описании многих реальных явлений.

Исследования в этом направлении выявили большое разнообразие динамики нелинейных систем и привели к одному из важнейших открытий XX века – динамическому хаосу [8, 9]. Классическими примерами хаоса являются азартные игры, которые, в частности, изучаются теорией вероятности. Однако азартные игры это недетерминированный процесс. Здесь допускается присутствие элемента случайности. Теория хаотических систем использует методы теории вероятности, но не является ее частью. Хаос же

следует определить как некоторый случайный процесс, который наблюдается в динамических системах не подверженных влиянию шумов или каких-либо случайных сил. Поэтому теория хаоса рассматривается как часть теории динамических систем.

Где же лежит граница между регулярной, но сложной динамикой и хаосом? Критерием может служить устойчивость системы к малым возмущениям. Если такая устойчивость отсутствует, детерминированное описание на больших временных интервалах теряет смысл и необходимо использовать статистические методы. Такой подход привел к необходимости определения хаотического поведения через чувствительную зависимость системы к начальным условиям и использованию показателей Ляпунова и энтропии в качестве критериев динамического хаоса.

Динамический хаос – сложное, неупорядоченное движение нелинейных систем, возникающее при отсутствии каких-либо случайных возмущений, которое привлекает к себе повышенное внимание в связи с устойчивой тенденцией перехода от теории к практике [10, 11].

Для реализации нетрадиционных алгоритмов записи, хранения, обработки и передачи информации, использующих свойства хаотической динамики систем, необходимы генераторы хаоса (ГХ) – устройства, преобразующие энергию внешнего источника в энергию хаотических колебаний.

Теоретические исследования и эксперименты показали, что использование хаотических аналоговых и дискретных генераторов в качестве несущих и модулируемых колебаний является привлекательным и эффективным в конфиденциальных системах связи. Среди весьма большого разнообразия используемых алгоритмов передачи информации на основе детерминированного хаоса заслуживают внимания те, которые имеют уже техническую реализацию и экспериментальные результаты, а именно:

- хаотическую маскировку, при которой информационный сигнал суммируется с хаотическим и передается в канал связи;
- переключения хаотических режимов: бинарный сигнал, например логическая 1, кодируется хаотическим сигналом одного типа, а логический 0 – хаотическим сигналом другого типа;
- нелинейное подмешивание, когда информационный сигнал участвует в формировании сложного хаотического сигнала.

При нелинейном подмешивании информационный сигнал непосредственно участвует в формировании сложного хаотического поведения ведущей системы. Такой ввод информации нельзя назвать ни аддитивным наложением, ни обычной модуляцией. В ведущей системе информационный сигнал $s(t)$ подмешивается к собственному сигналу системы $y(t)$. Например, это может быть сделано путём введения его в кольцо обратной связи генератора хаоса.

Для извлечения информации в приёмнике используется согласованный нелинейный фильтр, осуществляющий тот же тип нелинейного преобразования, как и в передатчике. Далее производится вычитание сигнала, прошедшего фильтр, из сигнала, поступившего на вход фильтра (ведомая система). Следует отметить, что в системе с нелинейным подмешиванием при полностью согласованном фильтре информационный сигнал на выходе приёмника извлекается точно.

Одним из решений при построении рассматриваемых систем является возможность совместного применения адаптивного подхода и методов управления, использующих нечеткую логику, что позволит создавать адаптивные нечеткие системы, содержащие в качестве адаптивного регулятора экспертную систему с нечеткой логикой. Такое решение наряду с преимуществами экспертного подхода к формированию законов управления, простоте и дешевизне по сравнению с системами, построенными на принципах самоорганизации и самоалгоритмизации, придает нечетким системам способность к адаптации при изменении условий функционирования.

Адаптивное управление позволяет существенно улучшить динамику, оценить недостающие переменные, придать системе свойство робастности. В отличие от нечеткого подхода с возможностью формализовать для последующего анализа имеющуюся информацию, которая носит неопределенный характер, в процессе адаптации происходит последовательное раскрытие неопределенности, ведущее к увеличению «информированности» системы управления. Таким образом, задача адаптивного управления с нечеткой логикой состоит в обеспечении заданного функционирования объекта при изменении его условий работы (изменении характеристик внешних воздействий или параметров объекта управления) путем целенаправленной коррекции управления на основе нечеткого вывода [4, 5, 6, 7].

Взаимодействие адаптивного и нечеткого подходов возможно двумя путями. Первый состоит в организации процедур самообучения, самоалгоритмизации и самоорганизации нечеткого регулятора. Полученные таким образом «высокоинтеллектуальные» системы способны решать задачи управления в условиях большой априорной и текущей неопределенности структуры и параметров объекта. В системах нижнего уровня (исполнительные устройства, приводы) более целесообразен второй подход, который заключается в использовании нечеткого регулятора для реализации механизма адаптации.

Выводы

Способность нечеткого регулятора реализовать сложную нелинейную зависимость адаптивного воздействия от значений вектора ошибки дает возможность как для выбора наилучшего в смысле скорости сходимости процесса адаптации при минимальном показателе отклонения от эталонного движения алгоритма адаптации, так и для расширения диапазона адаптации.

При проектировании систем управления УПС довольно часто возникает проблема, характерная для проектирования почти всех нечетких систем реального времени. С одной стороны, система должна обеспечивать логические выводы достаточно высокого уровня, чтобы отвечать всем особенностям работы УПС, с другой стороны, в каждый данный момент система должна с высоким быстродействием компенсировать координатно-параметрические возмущения в условиях неполноты информации о них. Проблема может быть разрешена путем иерархической организации системы в виде двух уровней, отличающихся по функциональному назначению и быстродействию. При этом нечеткий регулятор может выполнять не основную, а дополнительную функцию управления объектом, работая параллельно с основным координатно-параметрическим регулятором и «мягко» реагируя на дополнительные внешние возмущающие воздействия.

Кроме того, такая декомпозиция системы позволяет улучшить показатели структуры за счет замечательного свойства нечеткого регулятора – возможности реализации необходимого нелинейного алгоритма управления.

Список литературы

1. Алиев Р.А. Принцип инвариантности и его применение для проектирования промышленных систем управления / Р.А. Алиев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
2. Павлов В. В. Инвариантность и автономность нелинейных систем управления / В.В. Павлов. – К. : Наук. думка, 1971. – 271 с.
3. Алиев Р.А. Идентификация и оптимальное управление нечеткими динамическими системами / Р.А. Алиев, Г.М. Мамедова // Техн. кибернетика. – 1993. – №6. – С. 118–126.
4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
5. Кудинов Ю.И. Нечеткие системы управления / Ю.И. Кудинов // Техн. кибернетика. – 1990. – №5. – С. 196–206.
6. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
7. Mamdani E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguisticsynthesis// IEEE Trans. of Comp[ter. – 1977. – Vol. 26. № 12. – P. 1182–1191.
8. Мухин Р.Р. Очерки по истории динамического хаоса / Р.Р. Мухин. – М. : Вест-Консалтинг, 2007.
9. Муи Ф. Хаотические колебания / Ф. Муи. – М. : Мир, 1990.
10. Основы теории сложных систем / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. – М. – Ижевск: РХД, 2007.
11. Введение в теорию динамических систем / А.Б. Коток, Б. Хасселблат. – М. : МЦНМО, 2005.

Відомості про авторів

Смирнов Владимир Сергеевич – д.т.н., профессор, Государственный университет телекоммуникаций МОН Украины,

Самков Александр Всеволодович – д.т.н., старший научный сотрудник Института электродинамики НАН Украины, samkov@ied.org.ua

Иваниченко Евгений Владимирович – аспирант, Государственный университет телекоммуникаций МОН Украины,

Беленок Надежда Владимировна – аспирант, Государственный университет телекоммуникаций МОН Украины.

УДК 004.021

Т. І. Трояновська, О. І. Гороховський, О. В. Бойко

МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ РОЗКЛАДІВ ЗА АЛГОРИТМОМ ПАРЕТО

Вінницький Національний Технічний Університет, м. Вінниця

Анотація. Дана робота присвячена дослідженню методів, застосованих до автоматизації планування освітнього процесу. У статті виконано порівняльний аналіз існуючих засобів для створення автоматичних розкладів та деталізовано вимоги до розробки засобів формування автоматичних розкладів у навчальних закладах. Запропоновано схему моделі формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето та розроблено модель формування автоматичних розкладів, що заснована на методі компромісів Парето та класичній теорії розкладів. Також розроблено алгоритм компромісів для формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето та створено відповідний інструментарій у вигляді програмного засобу.

Ключові слова: автоматизація планування, метод Парето, модель формування автоматичних розкладів.

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию методов, применимых к автоматизации планирования образовательного процесса. В статье выполнен сравнительный анализ существующих средств для создания автоматических расписаний и детализованы требования к разработке средств формирования автоматических расписаний в учебных заведениях. Предложена схема модели формирования автоматических расписаний за алгоритмом Парето и разработана модель формирования автоматических расписаний, основанная на методе компромиссов Парето и классической теории расписаний. Также разработан алгоритм компромиссов для формирования автоматических расписаний по алгоритму Парето и создан соответствующий инструментарий в виде программного продукта.

Ключевые слова: автоматизация планирования, метод Парето, модель формирования автоматических расписаний.

Abstract. This work is devoted to research of applicable methods for educational process automation planning. In the article, the comparative analysis of existent facilities for automatic time-tables creation is executed. The development requirements are gone into details to automatic time-tables forming facilities in educational establishments field. The automatic time-tables forming model chart is offered after the Pareto algorithm. The automatic time-tables forming model is developed, which is based on the Pareto compromises method and classic theory of time-tables. The compromises algorithm is also used for automatic time-tables forming after the Pareto algorithm and the proper tool is created as a software.

Keywords: automation planning, Pareto method, automatic time-tables model.

Вступ

Задачі побудови розкладу виникають кожного разу, коли існує можливість вибору того чи іншого порядку виконання робіт. Якщо мова йде про побудову оптимального в тому чи іншому сенсі розкладу, задачі його створення виявляються достатньо складними.

Згідно з класичною теорією розкладів, система планування розкладу є одностадійною системою, побудованою без переривань з використанням списку. Однак, процес побудови алгоритму планування такого розкладу за допомогою стандартних алгоритмів теорії розкладів виявляється досить складним, зважаючи на те, що основними критеріями ефективності розкладу, згідно з класичною теорією розкладів є його довжина та час проходження.

Як правило, критерії оптимальності протирічать одне одному. Для розв'язання цих протиріч та знаходження узгодженого оптимального рішення пропонується використовувати метод компромісів Парето.

Застосування методу компромісів Парето дозволить формувати розклад по дисциплінах, враховуючи мінімальні накладки та мінімальні переміщення груп (або викладачів) по аудиторіях.

Актуальність

Потужні процеси модернізації сучасної вищої школи викликають потребу в розробці моделей планування навчального процесу, зокрема, при формуванні автоматичних розкладів. Тому існує потреба в аналізі, дослідженні і розробці ефективних методів та зручних у використанні засобів для планування та формування розкладів у академічних закладах з метою зменшення кількості випадкових накладок при організації навчального процесу.

Мета статті

Метою статті є створення моделі формування автоматичних розкладів на основі методу компромісів Парето та класичної теорії розкладів для формування автоматичних розкладів у навчальних закладах.

Задачі

1. Порівняльний аналіз існуючих засобів для створення автоматичних розкладів та виявлення вимог до засобів формування автоматичних розкладів у навчальних закладах;
2. Розробка моделі формування автоматичних розкладів за методом Парето;
3. Розробка та тестування програмного засобу, що реалізує модель формування автоматичних розкладів за методом Парето.

Аналіз існуючих програм формування автоматичних розкладів

Нині на ринку існує безліч найменувань програм формування автоматичних розкладів. Розглянемо основні з них: University Scheduler Engine; Vacation Scheduler; Room Scheduler System; University ERP System. Результати порівняння у таблиці 1.

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз існуючих засобів для формування автоматичних розкладів

Засіб	Недолік	
University Scheduler Engine	Надмірна обтяженість інтерфейсу, і необхідність проходження складних «кроків» при плануванні розкладу (за принципом «майстра»).	розглядають тільки часові компроміси
Vacation Scheduler	обмеженість і орієнтованість на серверну роботу	
Room Scheduler System	планування розкладу відбувається за допомогою «тікетної» системи, в яких викладач подає заявку на використання тієї чи іншої аудиторії в часовій сітці конкретно узятого дня	
University ERP System	тільки її серверну орієнтованість, саме тому така система для більшості дрібних вузів незастосовна	

UniversitySchedulerEngine (рис. 1) побудовано на календарному принципі, і дозволяє організувати декілька варіантів розкладу на тиждень. До переваг цієї програми можна віднести те, що вона може бути пристосована до умов і специфіки роботи не тільки навчального закладу.

VacationScheduler (рис. 2) також відноситься до календарного типу. Однак на відміну від попереднього, VacationSchedulerзасновано на принципі єдиного вікна, де всі елементи, необхідні для побудови розкладу, сконцентровані в одному місці, і це робить програму зручною для використання.

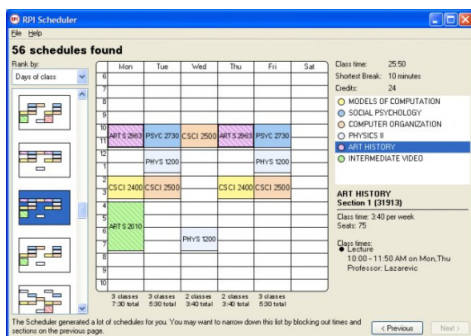


Рисунок 1 - Діалогове вікно UniversitySchedulerEngine

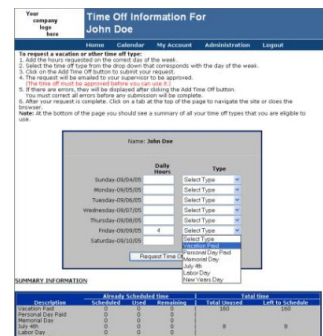


Рисунок 2 - Діалогове вікно VacationScheduler

RoomSchedulerSystem (рис. 3) побудована на принципі єдиного вікна, як і попередня. Однак її вигідно вирізняє можливість планування розкладу на основі компромісів по правам на аудиторію.

University ERP System (рис. 4) – найскладніша із розглядуваних систем-аналогів, які використовуються нині закордонними університетами. Фактично, це цілісна система керування розкладом у масштабі потужного навчального закладу. До її переваг слід віднести простоту інтерфейсу – тут теж все побудовано за принципом єдиного вікна, причому весь процес планування поділено на чіткі логічні сегменти, кожен з яких повністю описується одним діалоговим вікном.

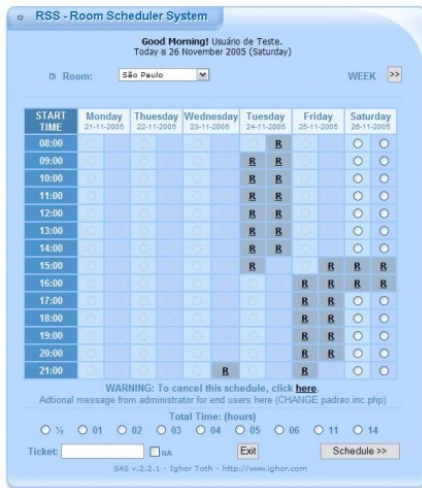


Рисунок 3 - Діалогове вікно RoomSchedulerSystem

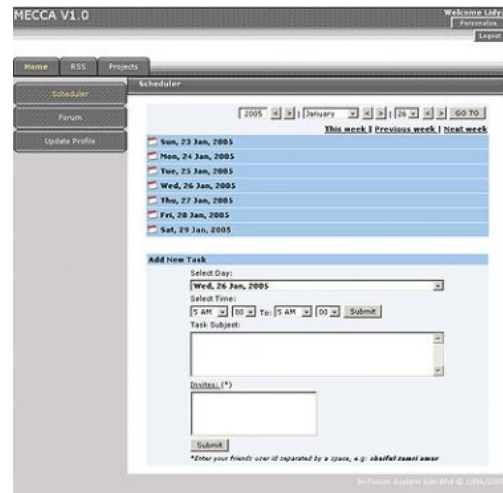


Рисунок 4 - Діалогове вікно University ERP System

Розробка вимог до засобів формування автоматичних розкладів у академічних закладах

Більшість користувацьких інтерфейсів будуються за одними і тими самими принципами та вимогами. Наведемо для подальшого опису основної архітектури систем графічного інтерфейсу. Вони такі: знайомість; простота; доступність; знаходжуваність рішень.

За умови дотримання цих основних принципів на етапі проектування можна оптимізувати побудову інтерфейсу системи, а відтак знизити її вимоги щодо потужності, адже що простіший інтерфейс, то менша кількість елементів керування задіяна у процесі утворення користувацького робочого простору. А це, у свою чергу, призводить до зниження системних вимог до програмного забезпечення.

Наступним, після формулювання ідеї, етапом створення програмного засобу є побудова візуального відображення. До компоновки робочого простору також виставляються відповідні вимоги: інтуїтивність інтерфейсу; логічне групування; мінімальна відстань руху.

На основі вищевказаних вимог будуються такі вимоги до користувацького інтерфейсу запропонованого засобу формування автоматичних розкладів у академічних закладах за алгоритмом Парето:

1. Мінімізація щільності інформації. При відображенні візуальних об'єктів на робочому просторі інформація повинна містити тільки ті дані, які дають найточніший та найповніший опис події у мінімальному обсязі.
2. Щільність екрану. Для даної роздільної здатності щільність заповнення елементами керування екрану повинна становити не більш як 60% від загальної площі екрану.
3. Інтегрованість даних. Якщо користувач потребує для розв'язування задачі певних даних або елементів керування, то вони мають бути сконцентровані в межах одного робочого простору.
4. Прямі форми роботи. Кількість проміжних стадій між заданням параметрів команди та отриманням реакції системи повинна бути мінімальною.
5. Підтримка контексту роботи. Кожен візуальний об'єкт на робочому просторі повинен мати або миттєве позначення (підказку), або таку форму, яка б дозволяла користувачу в процесі виконання задачі розуміти, що саме відбувається в системі.
6. Виділення. Якщо дія відбувається над певним візуальним об'єктом на робочому просторі, такий об'єкт має бути виділений, щоб користувач одразу міг звернути на нього увагу.
7. Чітко роздільне розташування та формат. Всі елементи керування, які відповідають за ключові параметри та дані, необхідні для виконання задачі, повинні мати чітко роздільні для користувача розташування та формат, який не вимагає додаткових знань чи навичок.

8. Відображення поточного стану. Якщо процес виконання задачі вимагає проходження декількох стадій, або значних витрат часу та обчислювальних ресурсів, то відповідним чином користувача слід інформувати про перебіг процесу та його поточного стану.
9. Можливість скасування дій. Будь-яка команда, дана користувачем, повинна мати механізм скасування. Це зменшує кількість оцінок та зниження вірогідності, що система увійде в нестабільний стан.
10. Ведення журналу дій. Для забезпечення такої можливості як відміна дії необхідно забезпечити засоби збереження історії всіх дій користувача.
11. Відображення заданих параметрів. Поточний стан всіх параметрів, які необхідні для виконання поточної команди, повинні відображатись так, щоб знаходитись у фокусі зору людини, безпосередньо перед виконанням самої дії, або відображенням реакції на цю команду.

3. Модель формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето

Модель формування та формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето базується на понятті часового фактору та допоміжних параметрів, за допомогою яких визначаються обставини події, яка повинна статися [1].

Основою для моделі планування розкладу у вищому навчальному закладі є часова сітка. Часова сітка представляє собою пару виду: «початковий час»-«кінцевий час». Схеми планування, повинні включати до себе ці параметри. Допоміжні фактори визначаються із формального опису події. В даному випадку такий опис включає в себе такі елементи:

- ім'я викладача;
- аудиторія;
- день тижня;
- семестр.

Формування розкладу представляє собою форму розв'язання задачі покриття, яка вирішується методом гілок і меж, або повним перебором. Навіть відкидаючи варіанти, що містять завідомо невірні, чи надлишкові рішення задачі, в процесі формування розкладу буде отримано декілька рівноцінних рішень, серед яких складно вибрати найкращий. Зазвичай, для цього використовується експертна оцінка.

Однак така оцінка також піддається моделюванню на основі алгоритму Парето, застосовуючи до сформованих варіантів оцінки за додатковими частковими критеріями.

Виокремимо такі вимоги до моделі формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето: локалізація, визначеність, унікальність, пріоритет [2].

Локалізація. Кожен запис повинен містити дані про розташування заняття.

Визначеність. Для кожного запису визначається як початковий, так і кінцевий час відповідно часовій сітці.

Унікальність. Жоден запис із однаковою часовою сіткою не повинен дублюватись.

Пріоритет. Кожен запис повинен бути записаний або в семестровий або в річний план таким чином, щоб запис, який уже є в річному плані, не повинен існувати в семестровому.

Схема моделі формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето наведена на рисунку 5.

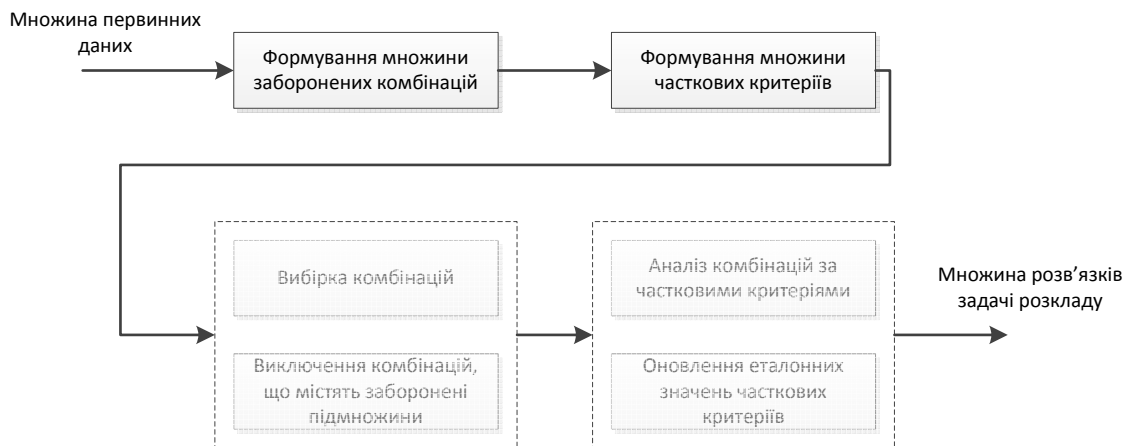


Рисунок 5 - Схема моделі формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето

Скористаємось у якості початкової бази методом повного перебору.

Представимо кожен розклад у вигляді комбінаторного виразу, де у якості «абетки» будуть порядкові номери викладачів. Сам розклад, таким чином, є вектором вигляду:

$$R = \{T_1, T_2, \dots, T_d\}, \quad (1)$$

де d – кількість учбових днів на тиждень,

q – кількість занять на день,

T_x – ідентифікатор викладача. У випадку, якщо щодня в розкладі не рівна кількість пар за «пустими» закріпимо особливе значення T_0 .

Відповідно, якщо використовувати повний перебір, то кількість комбінацій-розкладів становитиме:

$$Q(R) = c \quad (2)$$

Ці комбінації необхідно обмежити, оскільки із загальної множини рішень не менше половини заздалегідь невірні. Кожен розклад, який буде отриманий в результаті роботи алгоритму, повинен мати додаткові характеристики, які дозволять оцінити якість не лише конкретно взятого розкладу, а й всієї підмножини комбінацій, до якого належить даний. Для цього застосуємо алгоритм Парето, який дозволяє оцінювати комбінації за певними частковими критеріями. В загальному вигляді він передбачає N циклів порівняння нових комбінацій із уже відібраними.

Модифікуємо його відповідно поставленій задачі.

- Використовуючи дані про відповідність предметів та викладачів, формується підмножина «заборонених» комбінацій;
- Якщо перетин поточної комбінації та «забороненої» дає ненульовий результат, з подальшого перебору виключається не лише сама ця комбінація, а й всі комбінації, які містять фрагмент $\{T_1, T_2, \dots, T_x\}$, де x – перший елемент, який співпав із елементами забороненої комбінації;
- Якщо перетин поточної комбінації та «забороненої» дає нульовий результат, застосовується аналіз компромісів.

4. Розробка алгоритму компромісів та моделі формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето

Розглянемо детальніше емпіричний принцип компромісу Вільфредо Парето, який полягає в тому що при виборі із двох випадків, які вимагають одного і того самого набору параметрів чи залежать від одного і того самого набору факторів, перевагу слід надавати тому випадку, який або частково, або повністю вже існує [3]:

Опишемо формальну схему алгоритму компромісів, вважаючи, що частковими критеріями для розкладу є характеристики часових параметрів і наявність «накладок», тобто, надлишковість розкладу:

1. Порівняти часові параметри для кожного запису в поточному розкладі.
2. Якщо ці параметри співпадають, то перевірити співпадіння параметрів аудиторія (визначення накладки по локалізації події).
3. Якщо аудиторії співпадають, то виключити той запис, який за внутрішнім порядком записів було внесено останнім;
4. Якщо аудиторії не співпадають, то перевірити співпадіння параметру Викладач (визначення накладки викладача);
5. Якщо викладачі співпадають, то виключити той запис, який за внутрішнім порядком записів було внесено останнім;
6. Якщо викладачі не співпадають, порівняти параметр Семестр. Якщо один із записів має семестрову дію, а інший – річну, то виключити той запис, який має семестрову дію.

Блок-схема алгоритму компромісів для моделі формування автоматичних розкладів за алгоритмом Парето наведено на рисунку 5.



Рисунок 5 – Блок-схема роботи моделі компромісів за алгоритмом Парето

5. Розробка та тестування програмного засобу, що реалізовує модель формування автоматичних розкладів за методом Парето

Інтерфейс програмного засобу було розроблено із врахуванням вище наведених вимог до засобу формування автоматичних розкладів у академічних закладах за алгоритмом Парето. Основою побудови було обрано «принцип одного вікна» (рис. 6), де усі елементи користувацького інтерфейсу максимально сконцентровані в одному діалоговому вікні, так що користувач має можливість легко доступитись до будь-якого із значущих елементів і перейти у допоміжні вікна [4] (рис. 7).

Користуючись парадигмою проектування інтерфейсу зверху донизу і зліва направо, у відповідному порядку було розташовано:

- Список вже створених елементів розкладу;
- Область створення нового елемента та редагування існуючого;
- Кнопкова панель.

Використання так званого «лінійно-сітчастого» принципу розташування елементів кожному із них була визначена своя комірка, що дозволило вибудувати всі елементи у такому порядку, який максимізує швидкість роботи користувача. Водночас, лінійно-сітчасте розташування дозволяє користувачу «читати» область редагування, оскільки всі елементи його організовані в логічному порядку. Це спрощує процес інтуїтивного опанування користувачем програми (рис. 8 та рис. 9). За потреби можна виконати експорт даних у HTML-файл (рис. 10).

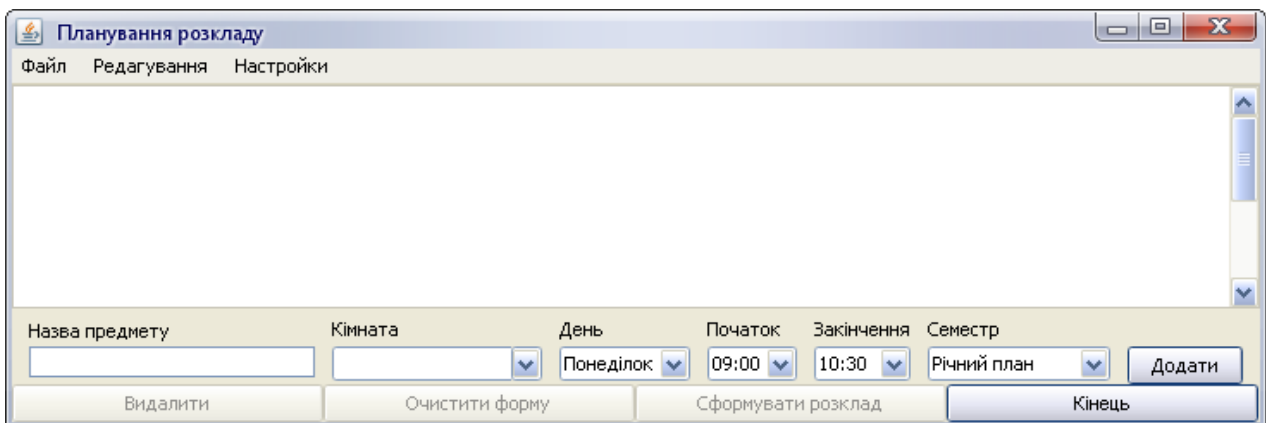


Рисунок 6 – Робоча область програми формування автоматичних розкладів

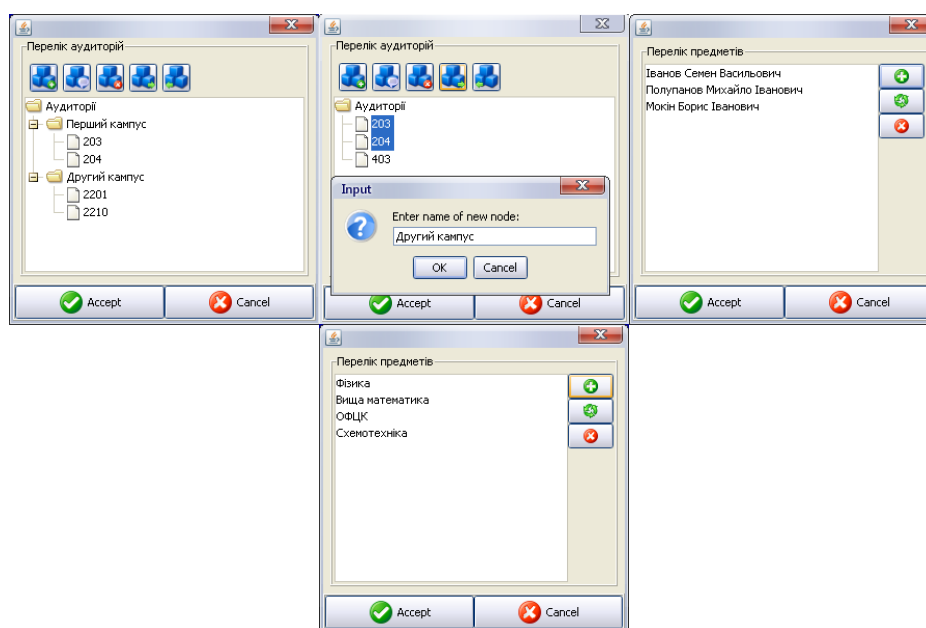


Рисунок 7 – Деякі допоміжні вікна

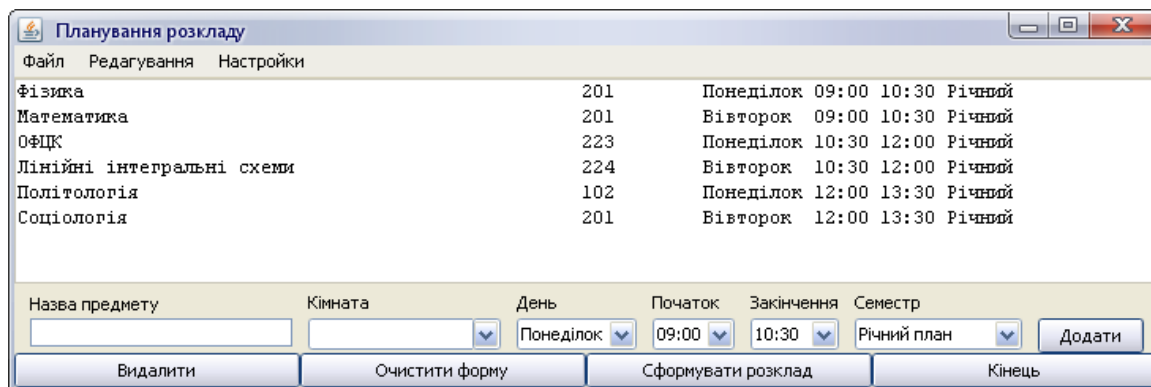


Рисунок 8 - Складання простого плану розкладу

	Понеділок	Вівторок
09:00 - 09:30	Фізика (201)	Математика (201)
09:30 - 10:00	ОФЦК (223)	Лінійні інтегральні схеми (224)
10:00 - 10:30	Політологія (102)	Соціологія (201)
10:30 - 11:00		
11:00 - 11:30		
11:30 - 12:00		
12:00 - 12:30		
12:30 - 13:00		
13:00 - 13:30		

Рисунок 9 – Сформований розклад

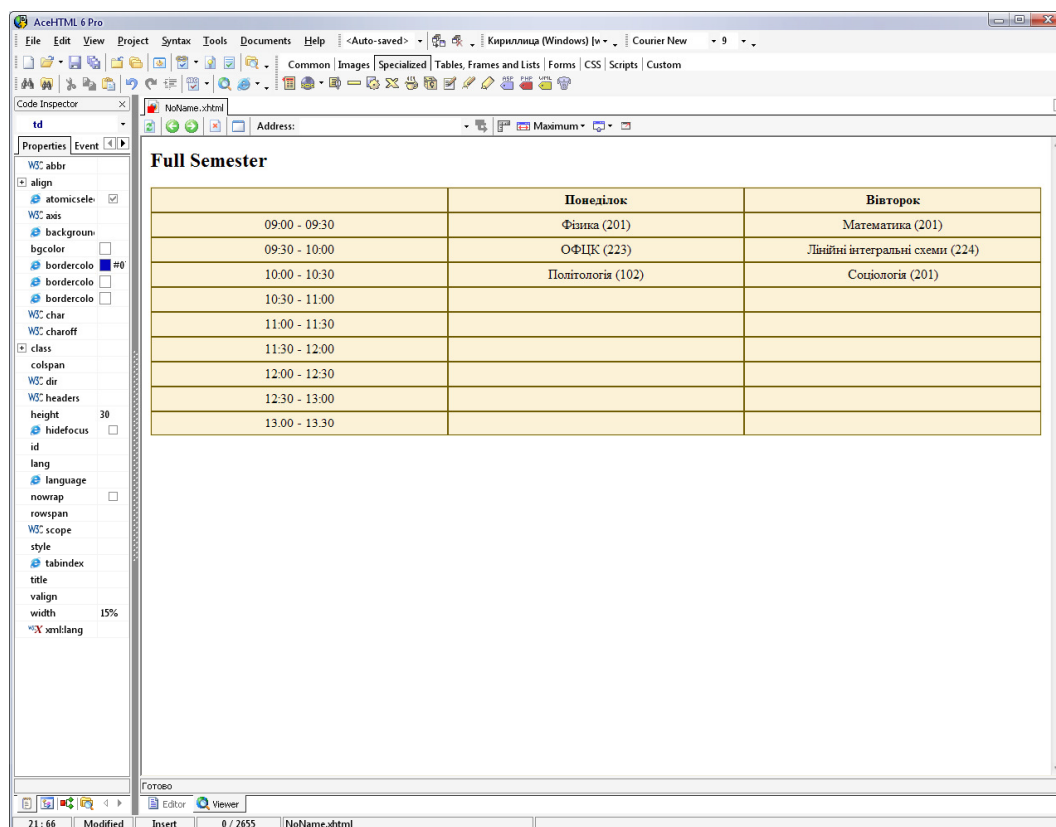


Рисунок 10 – Перевірка експорту в HTML

Висновки

У даній статті виконано порівняльний аналіз сучасних засобів для створення автоматичних розкладів та розроблено вимоги до засобів формування автоматичних розкладів у навчальних закладах, їх користувацького інтерфейсу та робочого простору.

Зокрема, розроблено та описано модель формування автоматичних розкладів та розроблено алгоритм на основі методу компромісів Парето та класичної теорії розкладів для розробки програмного засобу формування автоматичних розкладів у навчальних закладах різних типів акредитації.

Розроблено та виконане тестування програми, що відповідає вимогам до засобів формування автоматичних розкладів у навчальних закладах та реалізовує модель формування автоматичних розкладів на основі методу компромісів Парето.

Література

1. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
2. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. – М.: Радио и связь, 1984. – 248 с.
3. В. Писляков «Правило Парето и статистика использования электронных журналов в университетской библиотеке», Режим доступа: <http://www.gpntb.ru/win/inter-events/crimea2004/disk/doc/276.pdf>
4. Гороховський О. І. Комп'ютерна програма «Адаптивна система дистанційної освіти» / О. І. Гороховський, Т. І. Трояновська, В. О. Трухманов // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 26330. – К.: Державний департамент інтелектуальної власності України. – Дата реєстрації 22.07.2008 р.

Відомості про авторів

Гороховський Олександр Іванович – доцент, к.т.н., Вінницький національний технічний університет

Трояновська Тетяна Іванівна – ст. викл, к.т.н., Вінницький національний технічний університет

Бойко Олександр Володимирович – ст. викл, к.т.н., Вінницький національний технічний університет

УДК 621.311

Ю. А. Шулле, І. С. Рогозянський

ВИКОРИСТАННЯ АСКОЕ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. Розглянуто можливість використання автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) для підвищення ефективності енерговикористання на промислових підприємствах. Показано, що АСКОЕ дозволяє здійснювати точний і швидкий контроль за споживанням енергоресурсів, підвищуючи достовірність обліку і оптимізуючи витрати на енергоресурси. Об'єднання лічильників комерційного і технічного обліку в єдину систему дозволяє формувати поточний баланс електроспоживання підприємства, який є основною базою для вдосконалення нормування енергоспоживання. В АСКОЕ ведеться інтегральний облік економії наростаючим підсумком, ставляться оцінки персоналу і менеджменту, ведеться історія заходів щодо підвищення ефективності виробництва і створюється постійний зворотний зв'язок для його досконалості.

Ключові слова: автоматизована система комерційного обліку електроенергії, енерговикористання, електроенергія, промислове підприємство.

Аннотация. Рассмотрена возможность использования автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) для повышения эффективности энергоиспользования на промышленных предприятиях. Показано, что АСКУЭ позволяет осуществлять точный и быстрый контроль за потреблением энергоресурсов, повышая достоверность учета и оптимизируя затраты на энергоресурсы. Объединение счетчиков коммерческого и технического учета в единую систему позволяет формировать текущий баланс электропотребления предприятия, который является базой для усовершенствования нормирования энергопотребления. В АСКУЭ ведется интегральный учет экономии нарастающей суммой, выставляются оценки персоналу и менеджменту, ведется история мероприятий повышения эффективности производства и создается постоянная обратная связь для его совершенствования.

Ключевые слова: автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии, энергоиспользование, электроэнергия, промышленное предприятие.

Abstract. There was considered the possibility of using the automated commercial electricity metering system to improve energy efficiency in the industrial enterprises. It is shown that AMR allows current and quick control of energy consumption, increasing reliability of accounting and optimizing energy costs. Combining meters of commercial and technical accounting in one system allows you to create the current balance of power consumption of the enterprise, which is the main base for the improvement of energy rationing. AMR is integrated in savings account cumulatively, are evaluating staff and management, is the story of measures to improve efficiency and create a continuous feedback for its excellence.

Keywords: automated commercial electricity metering system, energy use, electricity, industrial enterprise.

Вступ

Актуальність встановлення автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) є досить великою, так як в умовах світових цін на енергоносії і глибокої фінансової, енергетичної та екологічної криз найважливішим завданням, яке стоїть перед керівником кожного підприємства, є підвищення енергоефективності виробництва. Перший крок на цьому шляху — це скорочення витрат електроенергії за рахунок зниження нераціональних витрат енергії при її транспортуванні та використанні. Керівнику підприємства, який прийняв рішення про скорочення витрат електроенергії, необхідно мати правдиву інформацію про ефективність використання електроенергії на підприємстві, про основні втрати та їх причини, одержати кваліфіковане техніко-економічне обґрунтування конкретних першочергових заходів, що дають можливість знизити витрати електроенергії. Саме з цією метою встановлюються автоматизовані систем комерційного обліку електроенергії [1-3].

Матеріали дослідження

В усіх розвинених країнах збір і обробка інформації про споживання електроенергії являє собою цілу індустрію із залученням новітніх технологій. У нашій країні також почав зростати інтерес до розробки та впровадження подібних систем. Для отримання економічних результатів встановленням одних лічильників не обійтись. Для цього потрібна автоматизація збору та обробки даних. Сам по собі облік енергоресурсів не знижує їх споживання, але створення АСКОЕ є важливим кроком у ланцюжку заходів щодо підвищення ефективності енерговикористання на промислових підприємствах.

Автоматизована система комерційного обліку електроенергії — це комплекс технічних, математичних, алгоритмічних і програмних методів та засобів, що призначені для комерційного обліку електричної енергії. Основне призначення АСКОЕ на промисловому підприємстві полягає в точному обліку та оперативному контролі спожитої електроенергії, забезпеченні можливості зберігання отриманих даних, протягом певного часу і доступу до них для проведення розрахунків. Важливою складовою АСКОЕ є можливість обробки даних, їх аналіз та прогноз (коротко-, середньо- і довгостроковий).

Ю. А. Шулле, І. С. Рогозянський, 2016

Сучасна АСКОЕ передбачає застосування багатофункціональних електронних лічильників електроенергії, які мають перевагу перед іншими типами лічильників в частині надання споживачу повних та достовірних даних [1-3].

Мета створення та експлуатації АСКОЕ полягає в постійній економії енергоресурсів і фінансів підприємства при мінімальних грошових витратах. Економічний ефект досягається за рахунок багатьох факторів:

- економічно правильного замовлення лімітів потужності виходячи з аналізу кількості спожитої електроенергії в години пік;
- визначення точок несанкціонованого доступу до джерел енергії;
- відпрацювання оптимального, економічно вигідного режиму включення-виключення енергоспоживачів;
- забезпечення оперативного контролю та управління споживанням енергоносіїв протягом доби;
- посилення дисципліни використання енергоносіїв споживачами;
- раціонального планування часу роботи цехів і підрозділів протягом доби;
- скорочення кількості контролерів-обхідників;
- своєчасне виявлення розкрадань електроенергії;
- відсутність спотворень при знятті показів електролічильників за рахунок виключення людського фактору.

Для підвищення ефективності обліку та контролю АСКОЕ окрім лічильників комерційного обліку повинна також включати лічильники технічного обліку електроенергії. Два види обліку, комерційний і технічний, мають свою специфіку. Комерційним називають облік споживання енергії підприємством для грошового розрахунку за неї. Технічний облік для контролю процесу споживання електроенергії в середині підприємства по його підрозділах, об'єктах, електроприймачах. Комерційний облік консервативний, має усталену схему енергопостачання. Для нього характерна наявність невеликої кількості точок обліку, для яких потрібне встановлення приладів підвищеної точності. Окрім того, системи комерційного обліку пломбуються, що обмежує можливості внесення до них будь-яких оперативних змін з боку персоналу підприємства. Технічний облік, навпаки, динамічний і постійно розвивається, відображаючи мінливі вимоги виробництва. Для нього характерна велика кількість точок обліку з різними завданнями контролю енергоресурсів, за якими можна встановлювати в цілях економії коштів прилади зниженою точності. Відсутність пломбування приладів дозволяє службі головного енергетика підприємства оперативно вносити зміни в схему технічного контролю енергоресурсів, в уставки первинних вимірювальних приладів у відповідності з поточними змінами в схемі енергопостачання підприємства і специфікою розв'язуваних виробничих завдань [1-3].

Об'єднання лічильників комерційного і технічного обліку в єдину систему дозволяє формувати точний баланс електроспоживання підприємства, котрий є основною базою для вдосконалення нормування енергоспоживання, оперативно виявляти і ліквідувати втрати і неефективні затрати електричної енергії всередині підприємства, визначати фактичну потужність, що використовується підприємством, в тому числі максимальну потужність в часи найбільших навантажень енергосистеми, і є невід'ємною умовою ефективного управління і оптимізації режимів електроспоживання підприємства. Враховуючи специфіку комерційного і технічного обліку можна оптимізувати вартість створення АСКОЕ та її експлуатації. Створення єдиної системи на передній план виводить динамічний і статистичний контроль енергетичних потоків, створення багаторівневих і різночасових балансів, багатофакторний аналіз даних вимірювань, їх інтерполяція і екстраполяція для створення об'ємної картини ефективності використання енергії або оцінки роботи людей і устаткування.

Технічний облік можна покращити за допомогою центрів обліку енергії (ЦОЕ), що створюються на базі енергоємних приймачів. ЦОЕ повинен відповідати ряду вимог [4]:

- значне енергоспоживання структурним підрозділом підприємства, на базі якого створюють ЦОЕ;
- облік всієї спожитої ЦОЕ енергії;
- призначення особи, яка буде відповідати за ефективність енергоспоживання ЦОЕ.

Результати роботи ЦОЕ мають бути легко контрольованими. Це дозволить аналізувати та покращувати показники енергоефективності роботи підрозділу. Найбільш вдалим прикладом виділення окремого ЦОЕ є його формування на основі технологічної лінії з контрольованою кількістю продукції, одержаної в певних проміжках часу. В даному випадку існує можливість для співставлення витрат енергії з обсягом виготовленої продукції, тобто можливість визначення енергоефективності процесу. Для того, щоб визначити найбільш енергоємних споживачів необхідно проаналізувати річні енергобаланси підприємства, де загальні витрати енергії розподіляються між окремими підрозділами, а також приймачами енергії. Якщо енергобаланси підприємства не складені, то існує можливість використання паспорт-

них даних основного енергоємного обладнання, а його розташування на території підприємства дасть інформацію про можливе розміщення ЦОЕ [4].

Процес формування ЦОЕ передбачає встановлення додаткових лічильників, а аналіз існуючих розподільних систем дозволяє визначити конкретні місця для їх встановлення. Для розрахунку кількості додаткових лічильників можна скористатися методикою, яка визначає залежність їх кількості від рівня витрат коштів підприємства на оплату даного виду енергії.

Контроль енергоспоживання в ЦОЕ здійснюється на основі розроблених критеріїв, які визначають ефективність використання енергії. Ці критерії повинні відображати реально існуючі зв'язки між рівнем енергоспоживання та технологічними параметрами, від яких залежить енергоспоживання. В процесі управління енергоспоживанням найчастіше використовують регресійні моделі. Основні вимоги, що ставляться до вибору параметрів, які впливають на енергоспоживання в ЦОЕ наступні [4]:

- цільові параметри повинні відображати кінцеву мету використання енергії в ЦОЕ (наприклад, обсяг виробленої продукції);
- необхідно забезпечити, щоб враховані технологічні параметри, що визначають рівень енергоспоживання, не були залежними (не корелюються або слабо корелюються);
- перелік додаткових параметрів при побудові регресійної залежності слід здійснювати, орієнтуючись на малокеровані параметри, що схильні до випадкових змін в значних межах;
- повинна існувати можливість вимірювання цільових і додаткових параметрів з необхідною точністю.

Отже, об'єднана система комерційного і технічного обліку дозволяє:

- точно вимірювати параметри споживання енергоресурсів з метою забезпечення розрахунків відповідно до реальних обсягів їх споживання та мінімізації невиробничих витрат на енергоресурси, зокрема, за рахунок використання більш точних вимірювальних приладів або підвищення синхронності збору первинних даних;
- здійснювати комплексний автоматизований комерційний і технічний облік енергоресурсів і контроль їх параметрів по підприємству, його цехах, підрозділах з метою мінімізації виробничих і невиробничих витрат на енергоресурси;
- створювати точний електробаланс підприємства, аналіз якого допомагає визначати основні напрями економії і раціонального використання електроенергії, вибрати оптимальну стратегію планування і управління електроспоживанням підприємства;
- контролювати в реальному часі характеристики режимів електропостачання підприємства, а саме, за необхідністю оператор АСКОЕ може в інтерактивному режимі запросити актуальні дані на будь-який момент часу або здійснювати безперервний контроль поточних параметрів режимів електроспоживання підприємства, в тому числі в періоди максимальних навантажень енергосистеми;
- фіксувати відхилення контрольованих параметрів енергоресурсів, їх оцінка в абсолютних і відносних одиницях для аналізу як енергоспоживання, так і виробничих процесів з метою мінімізації витрат на енергоресурси і відновлення виробничих процесів після їх порушення через вихід контрольованих параметрів енергоресурсів за допустимі межі;
- прогнозувати енергоспоживання з метою мінімізації виробничих витрат на енергоресурси за рахунок планування енергоспоживання;
- автоматично керувати енергоспоживанням на основі заданих критеріїв і пріоритетних схем включення/відключення споживачів-регуляторів з метою мінімізації виробничих витрат на енергоресурси за рахунок економії ручної праці і забезпечення якості управління;
- підтримувати єдиний системний час з метою мінімізації невиробничих витрат на енергоресурси за рахунок забезпечення синхронних вимірювань;
- зменшити витрати підприємства на електроенергетичні ресурси без зниження рівня електроспоживання за рахунок вибору оптимальних тарифів під час розрахунків за електричну енергію;
- забезпечити необхідну точність й достовірність обліку електроенергії, що в свою чергу дозволить суттєво знизити вірогідність порушення договірних умов електропостачання, в тому числі перевищення потужності, заявленої підприємством в години максимальних навантажень енергосистеми, а відтак й знизити ризик нарахування штрафів;
- керувати режимами електроспоживання з метою оптимізації витрат на електричну енергію за рахунок використання електроенергії в години доби, яким відповідають найнижчі тарифні коефіцієнти, ще більше заощаджуючи під час оплати спожитої електроенергії.

Висновок

Постійне подорожчання енергоресурсів, а також значне збільшення їх споживання в останні роки змушує думати про більш жорсткий контроль їх використання, а також вимагає впровадження

ефективних засобів обліку, що сприяють зниженню витрат на енергоресурси. Використання автоматизованих система комерційного обліку електроенергії дозволяє здійснювати точний і швидкий контроль за споживанням енергоресурсів, підвищуючи достовірність обліку і оптимізуючи витрати на енергоресурси. Об'єднання лічильників комерційного і технічного обліку в єдину систему дозволяє формувати поточний баланс електроспоживання підприємства, котрий є основною базою для вдосконалення нормування енергоспоживання. АСКОЕ як ваги зважують кожен крок на шляху підвищення енергоефективності підприємства, ведуть інтегральний облік економії наростаючим підсумком, ставлять оцінки персоналу і менеджменту, ведуть історію боротьби за підвищення ефективності виробництва і створюють постійний зворотний зв'язок для його досконалості.

Список літератури

1. Коцарь О. В. Применение АСКУЭ для контроля текущих параметров режимов электропотребления на промышленных предприятиях / О. В. Коцарь // Энергетика и электрификация. – 2004. – № 6. – С. 24–29.
2. Коцар О. В. Застосування АСКОЕ для контролю характеристик режимів електропостачання та керування режимами електроспоживання на підприємстві фармацевтичної галузі / О. В. Коцар, Ю. О. Кот, Ю. О. Расько, С. В. Полевик // Управління, економіка та забезпечення якості в фармації. – 2010. – С. 18–27.
3. Праховник А. В. Концептуальні положення побудови АСКОЕ в умовах запровадження перспективних моделей енергоринку України / А. В. Праховник, О. В. Коцар // Энергетика та електрифікація. – 2009. – № 2. – С. 45–50.
4. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення: навч. посібник / Г. Г. Півняк, С. І. Випанасенко, О. І. Хованська та ін. – Д. : Національний гірничий університет, 2013. – 214 с.

Відомості про авторів

Шулле Юлія Андріївна – канд. техн. наук, старший викладач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

Рогозянський Ігор Степанович – магістрант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту.

УДК 621.316

О. С. Яндульський, О. О. Дмитренко, В. В. Заколюдажний

СУМІСНЕ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ MICROSCADA ТА АСЗІ МП АРГОН В АСУ ТП

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Анотація. У статті розглядаються питання побудови основної та резервної систем управління, збору та передачі інформації на прикладі систем, що входять до складу АСУ ТП пристанційних вузлів сонячних електростанцій м. Арциз (Дунайська) і м. Кілія (Придунайська). АСУ ТП кожного з пристанційних вузлів має у своєму складі основну систему управління (MicroScada, ABB, Швеція) та резервну систему управління, збору та передачі інформації (АРГОН, НТУУ «КПІ», Україна). Обидві системи мають повністю незалежні джерела отримання інформації про стан енергооб'єкту, незалежні канали керування комутаційним обладнанням. Кожна з систем забезпечує передачу інформації на верхні рівні управління по стандартних протоколах обміну інформацією.

Ключові слова: мікропроцесорні пристрої релейного захисту, система управління, автоматизована система диспетчерського керування.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы построения основной и резервной систем управления, сбора и передачи информации на примере систем, которые входят в состав АСУ ТП пристанционных узлов солнечных электростанций г. Арциз (Дунайская) и г. Килия (Придунайская). АСУ ТП каждого из пристанционных узлов имеет в своем составе основную систему управления (Microscada, ABB, Швеция) и резервную систему управления, сбора и передачи информации (АРГОН, НТУУ «КПИ», Украина). Обе системы имеют полностью независимые источники получения информации о состоянии энергообъекта, независимые каналы управления коммутационным оборудованием. Каждая из систем обеспечивает передачу информации на верхние уровни управления по стандартным протоколам обмена информацией.

Ключевые слова: микропроцессорные устройства релейной защиты, система управления, АСУТП.

Abstract. The article deals with the design of primary and redundant control systems, information collection and transmission systems on an example of the APCS station units of Artsyz and Kiliya solar power stations. APCS of station units each comprises of primary control system (MicroScada, ABB, Sweden) and backup control system with collecting and transmitting information functions (Argon, NTUU "KPI", Ukraine). Both systems have completely independent sources of information about the status of power station, independent switching equipment control channels. Each system transmits information to upper level in standard information exchange protocols.

Keywords: microprocessor relay protection, control system.

Вступ

Останнє десятиліття характеризується зростанням об'ємів світового виробництва тонкоплівкових сонячних модулів. Завдяки цьому швидкими темпами зростає також і об'єм виробництва сонячної електроенергії. Сумарна потужність сонячних електростанцій на сьогодні становить більше 70 ГВт і продовжує збільшуватися високими темпами [1]. Високі темпи розвитку сонячної енергетики в західних країнах дозволяють стверджувати, що сонячна енергетика незабаром стане одним з основних джерел електроенергії, наряду з традиційними. У міру того, як постачання палива стає менш надійним і дорожчим, ці джерела стають усе більше привабливими з економічної та екологічної точки зору. Лідерами у розвитку сонячної енергетики є європейські країни, швидкі темпи розвитку спостерігаються у Китаю, Індії, США. Для України останнього десятиліття також характерний бурхливий розвиток альтернативних джерел електроенергії, у т.ч. і сонячної. Побудовані СЕС на півдні нашої країни входять до двадцятки найбільших у світі. Зокрема, СЕС Дунайська (м. Арциз, Одеська обл.) – 43 МВт, Кілія (м. Кілія, Одеська обл.) – 54,8 МВт, забезпечують значну частину електроспоживання вказаних територій півдня України.

Інтеграція СЕС в ОЕС України приводить до необхідності врахування особливостей їх роботи [2]:

- більшість розподілених джерел електроенергії приєднані до розподільної мережі через пристанційні вузли;
- потужність генерації сонячних джерел електроенергії визначається зовнішніми факторами (в першу чергу інтенсивністю сонячного випромінювання) і мало залежить від режиму роботи електричної мережі, до якої вони приєднані;
- Пристанційні вузли СЕС – це підстанції без постійного обслуговуючого персоналу.

Вказані особливості приводять до необхідності досить частого виконання операцій керування на пристанційних вузлах комутаційними апаратами як приєднань до розподільної мережі, так і приєднань до СЕС. Наприклад, пристанційний вузол СЕС Кілія знаходиться на відстані 75 км від диспетчерського пункту СЕС ПС 330 кВ Арциз (ПівдЕС ДП НЕК «Укренерго»), де розміщується оперативний персонал. Тому побудова надійної системи дистанційного управління, збору та передачі інформації є задачею важливою і актуальною.

На пристанційних вузлах 110 кВ СЕС Дунайська та Килія до складу АСУ ТП входять основна та резервна автоматизовані системи диспетчерського керування (АСДК). Основна АСДК реалізована на базі автоматизованої системи управління MicroScada (ABB, Швеція), резервна – на базі АСЗІ МП «АРГОН». Причому, резервна АСДК окрім функцій управління виконує також функції багаторівневої системи збору та передачі інформації. Нижче будуть розглянуті основні принципи побудови основної та резервної АСДК.

Передумови застосування основної та резервної АСДК пристанційних вузлів 110 кВ СЕС Дунайська та Килія

Склад та функції АСДК проектувались з урахуванням можливостей дистанційного керування комутаційними апаратами та номенклатури пристроїв релейного захисту. При цьому враховувались особливості роботи пристанційних вузлів СЕС, а саме – досить висока частота комутаційних операцій при відсутності постійного оперативного персоналу. Тому до АСДК висувались вимоги підвищеної надійності функціонування. Всі комутаційні апарати вказаних пристанційних вузлів мають можливість дистанційного керування – вимикачі, роз'єднувачі та заземлюючі ножі 110 кВ виробництва ABB, вимикачі 10 кВ виробництва Таврида Електрик. Викатні елементи 10 кВ функції дистанційного керування не мають. Всі пристрої релейного захисту – виробництва ABB. Вказані пристрої забезпечують всі необхідні засоби моніторингу та управління відповідними комутаційними апаратами. Також використовуються пристрої контролю ізоляції PREMCO CX-100.

Найбільш традиційний підхід до виконання АСДК – використання в якості системи управління резервованої системи того ж виробника, що і релейного захисту, у даному випадку – MicroScada (ABB, Швеція), а в якості блоків керування комутаційними апаратами – мікропроцесорних пристроїв РЗА (МП РЗА). Причому для 100%-дубльованої системи резервується як апаратне забезпечення (сервери, джерела безперервного живлення, мережеві комутатори, кабельна система), так і програмне (дубльоване або полуторне). У цьому випадку на кожному приєднанні використовується два пристрої РЗА з незалежним живленням, на дискретні входи кожного з цих пристроїв заводяться окремі блок-контакти комутаційного обладнання, команди управління з вихідних реле МП РЗА також паралельно включаються в ланцюги керування. Даний підхід забезпечує високу надійність дистанційного керування та моніторингу. Можливі відмови системи керування зустрічаються досить рідко і викликані однотипними алгоритмічними помилками або однотипних пристроїв РЗА, або однотипного програмного забезпечення. Недоліком даного підходу є його висока вартість, в основному, викликана вартістю дублюючих комплектів пристроїв РЗА на кожному приєднанні.

Розглянутий варіант 100%-дубльованої АСДК для пристанційних вузлів 110 кВ СЕС Дунайська та Килія неможливий, так як для одного приєднання пристрої РЗА не дублюються. У таких випадках можливо використати частково дубльовану АСДК для МП РЗА з двома однотипними портами зв'язку. Причому для такого підходу резервується як апаратне забезпечення (сервери, джерела безперервного живлення, мережеві комутатори, кабельна система), так і програмне (дубльоване або полуторне). Але, так як МП РЗА один, то на його дискретні входи заводиться тільки одна група блок-контактів комутаційного обладнання, команди управління також не дублюються. Даний підхід забезпечує високу надійність апаратного та програмного забезпечення АСДК (серверів, ДБЖ, мережевих комутаторів, кабельної системи). Але пошкодження у вхідних або вихідних ланцюгах, вихід з ладу будь-якого контакту про положення комутаційного обладнання, вихід з ладу, або виведення з роботи пристрою РЗА приводить до відмови дистанційного керування даного приєднання або групи приєднань, навіть за умови працездатності апаратного та програмного забезпечення АСДК. Ще більше недоліків для АСДК при використанні МП РЗА з одним інтерфейсом зв'язку. У цьому випадку резервується тільки серверна частина та програмне забезпечення, а кабельна система та частина мережевих комутаторів не резервується і надійність знижується.

Ще більш простий підхід при побудові АСДК – нерезервована система (без резервного серверу). Надійність АСДК знижена суттєво – при виході з ладу будь-якого елемента АСДК, контактної системи, пристрою РЗА, система дистанційного керування відмовляє.

З метою забезпечення високої надійності та з урахуванням того, що на пристанційних вузлах 110 кВ СЕС Дунайська та Килія використовуються МП РЗА більшою частиною з двома різнотипними портами та у кількості одного пристрою на одне приєднання, прийнято рішення про застосування двох незалежних систем АСДК – основної та резервної. Кожна з цих систем має власне різнотипне програмне та апаратне забезпечення з повним об'ємом моніторингу та керування комутаційним обладнанням, але у якості джерел інформації та для видачі команд управління використовуються різні пристрої (рис. 1).

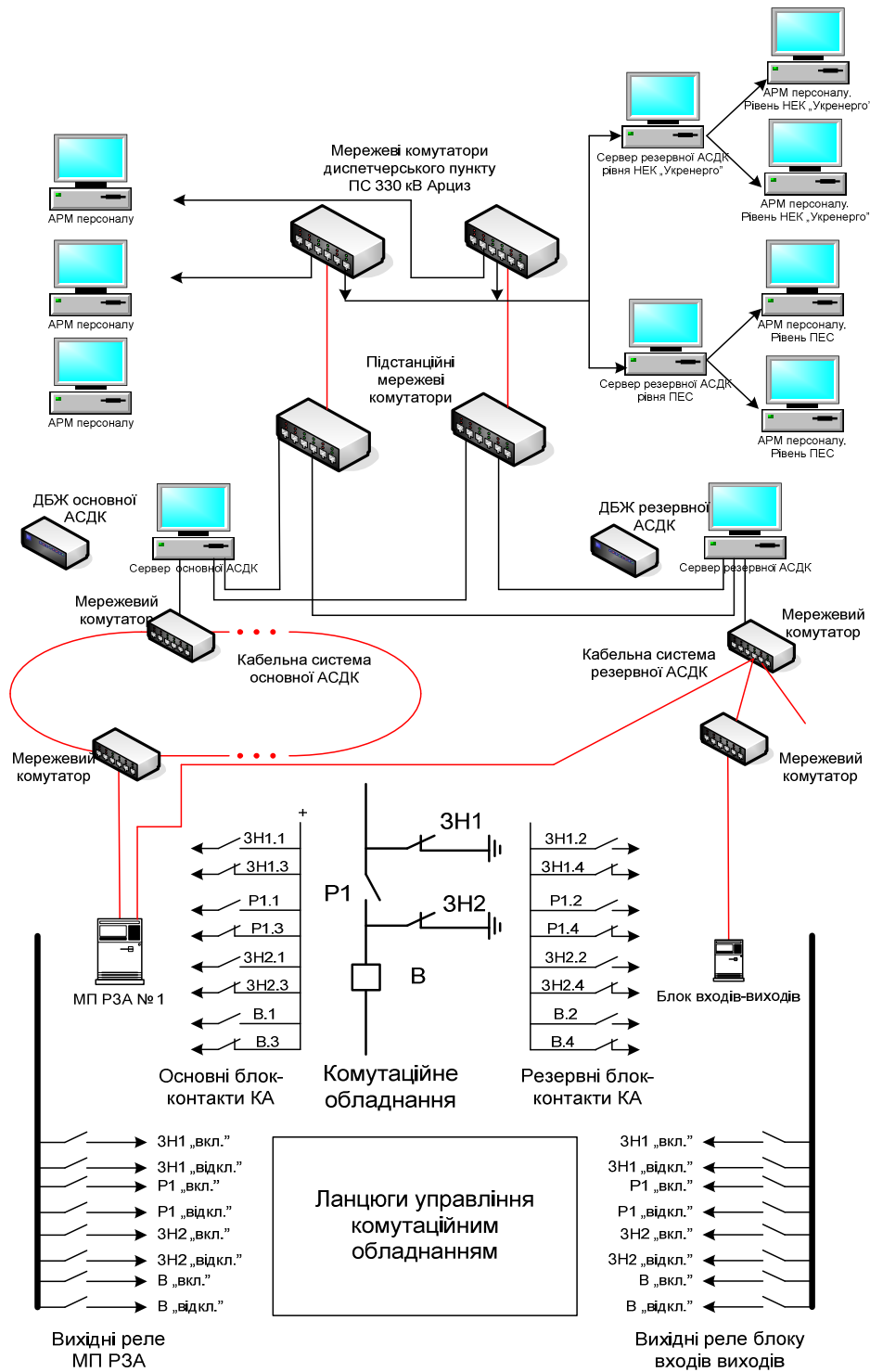


Рисунок 1 – Фрагмент побудови основної та резервної АСДК для одного приєднання

Побудова та функції основної АСДК

Основна АСДК реалізована на базі автоматизованої системи управління MicroScada (ABB, Швеція). Програмно-технічний комплекс основної АСДК є дворівневою системою і складається з кількох підрівнів [3]:

1. МП РЗА. Нижчий підстанційний підрівень Окрім виконання функцій безпосередньо релейного захисту та автоматики використовуються в якості давачів дискретної інформації про положення комутаційного обладнання, роботу захистів та аналогової інформації нормального та аварійного режимів. Також МП РЗА використовуються для видачі команд дистанційного управління зі своїх вихідних реле в

ланцюги керування комутаційним обладнанням. Обмін інформацією з вищим підстанційним рівнем відбувається за протоколом IEC-61850.

2. Вищий підстанційний підрівень. Включає в себе наступне апаратне забезпечення:

- сервер основної АСДК з джерелом безперервного живлення;
- мережеві комутатори. З урахуванням того, що обмін інформацією між МП РЗА та сервером системи відбувається за стандартом IEC-61850, мережеві комутатори обирались високошвидкісні промислові, з підтримкою цього стандарту, а саме – MOXA PT-7728.
- структурована оптично-кабельна система.
- Другий рівень основної АСДК – рівень диспетчерського пункту ПС 330 кВ Арциз. За допомогою АРМ-ів персоналу забезпечується людино-машинний інтерфейс з підстанційним рівнем.
- Окрім того, з підстанційного рівня забезпечується передача інформації та прийом команд дистанційного керування з ОУК ПЕС. Обмін інформацією здійснюється за стандартним протоколом обміну IEC-60870-5-104.
- Функції основної АСДК:
- моніторинг дискретної інформації про положення комутаційного обладнання пристанційного вузла;
- дистанційне керування комутаційним обладнанням пристанційного вузла;
- моніторинг дискретної інформації про роботу захистів (основні сигнали);
- моніторинг аналогової інформації нормального та аварійного режимів з МП РЗА;
- збереження та архівування у внутрішній базі даних (БД) всієї дискретної та аналогової інформації, отриманих з МП РЗА, комутаційних операцій;
- автоматична синхронізація всіх МП РЗА.
- передача архівованої інформації на верхній рівень управління.

Побудова резервної АСДК

Резервна АСДК реалізована на базі автоматизованої системи управління, збору та передачі інформації АСЗІ МП АРГОН (НТУУ «КПІ») і складається з двох підсистем – системи управління та системи збору інформації. При виборі структури підстанційного рівня системи враховувалось наступне:

- вихідні реле пристроїв РЗА вже використовуються для керування комутаційним обладнанням в основній АСДК. Тому, з метою підвищення надійності АСДК в цілому, для резервної АСДК обрано зовсім інший шлях керування – не через МП РЗА. Для керування з резервної системи використовуються вихідні реле мікропроцесорних блоків входів-виходів вітчизняного виробництва (УСДМ-01, ПАТ «Електротехнічний завод», м. Київ). Дискретна інформація про положення комутаційного обладнання, несправності блоків керування вимикачами зі входів УСДМ-01 передається на сервер резервної АСДК за протоколом MODBUS. Причому, знову ж таки з метою підвищення надійності, використовуються інші блок-контакти комутаційних апаратів;
- резервна система керування використовується у випадку виходу з ладу основної системи. Тому структура її обрана спрощеною, без використання відносно більш дорогих мережевих пристроїв з підтримкою стандарту IEC-61850;
- для уникнення ситуацій з одночасною відмовою однотипного програмного забезпечення (ПЗ) основної та резервної АСДК для резервної АСДК обрано інше програмне забезпечення – АРГОН.

Програмно-технічний комплекс резервної АСДК є трирівневою системою [4], з сервером системи на кожному рівні.

1. Рівень підстанції. Має кілька підрівнів:

- Нижчий підстанційний підрівень. В якості дачив інформації використовуються блоки входів-виходів УСДМ-01 та МП РЗА. За допомогою УСДМ-01 здійснюється моніторинг стану комутаційних апаратів, з них же відбувається резервне керування. У МП РЗА для підключення до резервної АСДК використовується другий порт, протоколи обміну інформацією – IEC-61850, SPA, MODBUS. З МП РЗА в систему збору передається повний об'єм дискретної та аналогової інформації (значно більший ніж у основній АСДК), у т.ч. і осцилограми аварійного процесу.
- Основний підстанційний підрівень. Отримана інформація зберігається та архівується у БД ORACLE підстанційного рівня, що встановлена на сервері резервної АСДК. ПЗ системи можливо поділяється на серверну на клієнтську частини.
- Третій підрівень – підрівень диспетчерського пункту. На АРМ-ах встановлено клієнтське ПЗ, яке забезпечує персоналу доступ до всієї інформації підстанційного рівня системи та керування комутаційним обладнанням пристанційного вузла.

2 та 3. Рівні Південної енергосистеми та НЕК «Укренерго». Інформація, отримана на першому підстанційному рівні автоматично передається на сервери АСЗІ МП АРГОН енергосистеми та НЕК «Укренерго» і доступна на будь-якому АРМ-і цих рівнів.

Висновки

1. Використання на пристанційних вузлах без постійного обслуговуючого персоналу двох незалежних систем управління з різними джерелами інформації про положення комутаційного обладнання, різними каналами виводу команд управління та різним програмним забезпеченням дає можливість підвищити надійність дистанційного керування та моніторингу.

2. Використання в якості резервної АСДК багаторівневої системи АСЗІ МП АРГОН дає можливість забезпечити не тільки функції резервного управління, а й функції збору інформації з МП РЗА незалежно від виробника пристрою або його протоколу обміну. Розроблена система передачі між базами даних всіх рівнів, яка працює в автоматичному режимі і має зручний інтерфейс доступу до інформації.

3. АСЗІ МП АРГОН успішно експлуатується на ряді підстанцій різних енергосистем і вже зараз її побудовані ієрархічно бази даних, та система передачі інформації між ними, можуть використовуватись в якості єдиного інформаційного середовища для різноманітних систем структури НЕК «Укренерго».

Список літератури

1. European Photovoltaic Industry Association. Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016. – URL: <http://www.epia.org/publications/epiapublications/globalmarketoutlookforphotovoltaicsuntil2016.html>

2. Яндутьський О.С. Моделювання і аналіз впливу сонячних електростанцій на режими роботи електричної мережі / О.С. Яндутьський, О.В. Хоменко, А.А. Марченко // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2013. – №1(14). – С. 324–329.

3. Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП : учебное пособие / В.А. Втюрин. – Санкт-Петербург, 2006. – 153 с.

4. Автоматична багаторівнева система збору та передачі інформації від мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики різних виробників для об'єктів НЕК «Укренерго» / О.С. Яндутьський, О.О. Дмитренко, В.В. Заколяжний [та ін.] // Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». – 2011. – № 11. – С. 455–463.

Відомості про авторів

Яндутьський Олександр Станіславович – д-р техн. наук, професор, декан факультету електроенергетичної техніки, НТУ «Київський політехнічний інститут».

Дмитренко Олександр Олексійович – к.т.н., доцент кафедри автоматизації енергосистем, НТУ «Київський політехнічний інститут».

Заколяжний Володимир Васильович – асистент кафедри автоматизації енергосистем, НТУ «Київський політехнічний інститут».