

УДК 004.051

О.І. Дорогань

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В МЕРЕЖІ КЕРУВАННЯ

**Вступ.** Основними вимогами до системи керування судовою електроенергетичною установкою (СЕУ) є можливість автоматичного або дистанційного контролю та керування генеруючими агрегатами (пуск та зупинка, синхронізація генераторів, розподіл потужностей між паралельно працюючими агрегатами) та судовим обладнанням; наявність засобів створення ергономічного інтерфейсу автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора, які мають містити засоби для складання топології схеми СЕУ, моніторингу та керування станом компонентів СЕУ в режимі реального часу та систему підтримки прийняття рішень оператора (необхідності введення генеруючого агрегата до паралельної роботи з мережею для забезпечення необхідного резерва потужності, оптимізації використання генеруючих агрегатів, вибору стратегії відключення електрообладнання при перевантаженні генеруючих агрегатів). Для забезпечення перелічених вимог система керування СЕУ має бути розподіленою, що передбачає наявність не менше двох ієрархічних рівнів: нижнього (систем керування приводними двигунами та генераторами, систем захисту генеруючих агрегатів, пристроїв забезпечення паралельної роботи генеруючих агрегатів та керування електропостачанням судового обладнання) та верхнього (АРМ оператора), пов'язаних за допомогою промислової мережі [1, 2]. Отримання даних про стан об'єктів керування відбувається з часовою затримкою, яка обумовлена часом оцифрування аналогового сигналу, обробкою отриманого значення та передачею даних по мережі; керування об'єктами – з затримкою, обумовленою формуванням пакету даних, його передачею по мережі, обробкою даних приймачем та часом реакції керуючого обладнання. Сучасні промислові мережі є багатоточковими [1, 2], тому часові затримки, пов'язані з передачею даних по мережі, можна вважати результатом дії трьох основних факторів: обмеження швидкості передачі даних, відстані між пристроєм та центром керування та завантаженості каналу зв'язку. В роботах [3, 4] показано, що найбільш суттєвий (на один-два порядки більше ніж інші) вклад в затримки вносить завантаженість каналу зв'язку. Затримки, що обумовлені цим фактором, можуть складати одиниці-десятки секунд, що не завжди є допустимим при керуванні СЕУ (при керуванні СЕУ не завжди є допустимим). Наприклад, при виникненні перевантаження генеруючих агрегатів система керування має зафіксувати подію та відреагувати на неї відключенням певних споживачів електроенергії від мережі на протязі 0,7-1,5 с [5].

**Мета.** Метою роботи є створення методики розрахунку характеристик інформаційних потоків розподіленої мережі керування СЕУ, яка дозволить визначити час реакції системи керування на виникнення передбачених на етапі проектування аварійних ситуацій в СЕУ та дії оператора.

**Основний матеріал.** Спеціалізоване програмне забезпечення, що використовується на верхньому рівні системи керування СЕУ, має підтримувати два режими роботи: режим складання топології схеми й налаштування параметрів для обміну даними з апаратним забезпеченням нижнього рівня, та режим моніторингу параметрів й керування обладнанням в режимі реального часу. Налаштування параметрів для обміну даними включає задання мереживих адрес та параметрів пристроїв, швидкості обміну даними, формату низькорівневих пакетів даних (числа інформаційних біт, схеми контролю парності, кількості стопових біт), максимального часу очікування даних, загальних тайм-аутів операцій читання та запису даних. Ці параметри характерні для всіх сучасних SCADA-систем [6]. Режим моніторингу параметрів та керування обладнанням для програмного забезпечення означає:

– отримання інформації від контролерів автоматизації та відображення її за допомогою компонентів індикації (світлодіодів, стрілочних та шкальних індикаторів, текстових полів) і додаткових діалогових вікон («Осцилограми», «Параметри Дизеля»);

– передачу контролерам автоматизації керуючих дій оператора (пуск дизеля, керування обертами дизеля, керування збудженням генератора, керування системами синхронізації генераторів та розподілу потужностей, що відповідають зміні дискретних станів відповідних пристроїв та програмно представлені зміною станів автоматів та елементів керування).

Одиницею обміну даними є транзакція, що складається з запиту та відповіді – запису та зчитування пакетів даних з СОМ-порту. Цикл обміну даними складається з наступних операцій (в порядку зниження пріоритетів):

- зміна стану дискретних виходів (при зміні стану автомату або натисканні кнопки управління);
- отримання станів дискретних входів (для відображення на світлодіодах);
- отримання одиничних аналогових значень (діючих значень струму та напруги, частоти, коефіцієнту потужності генераторів);

– отримання одиничних аналогових значень (вимірювання, пов’язані з дизелем; необхідні лише при відкритому діалоговому вікні «Параметри дизеля», та в кожний момент часу можливі лише для одного з компонентів схеми);

– отримання масивів аналогових значень (миттєвих значень струму та напруги генератора; необхідні лише при відкритому діалоговому вікні «Осцилограми» та в кожний момент часу можливі лише для одного з компонентів схеми).

Програмне забезпечення, з точки зору процесів обміну та обробки даних, можна розглядати як систему масового обслуговування без відмов, де вхідними потоками є заявки на обслуговування від компонентів схеми СЕУ. Тоді черга запитів буде складатися з постійних елементів (пов’язаних з отриманням станів дискретних входів та одиничних аналогових значень – параметрів генератора) та змінних. Останні можна поділити на тривалі змінні (що відповідають отриманню даних для відкритих діалогових вікон «Параметри дизеля» та «Осцилограми»), та короткочасні змінні (що відповідають зміні стану дискретних виходів). Часові інтервали між виникненнями заявок від компонентів, що формують змінну складову черги запитів, можна вважати розподіленими за експоненційним законом [4]. Для врахування пріоритету операцій та запобігання втрат транзакцій при зміні складу черги її зручно розділити на чотири окремих канали, що відповідають:

1) зміні стану дискретних виходів. Черга має бути буферизованою для виключення втрати команди, що прийнята під час роботи з нею при обміні даними. Заповнення буферу відбувається при зміні стану автомату або натисканні на кнопку управління (елементи АРМ оператора). Під час обміну даними здійснюється виконання транзакцій для всіх елементів основної черги, після чого вона міняється місцями з буферною.

2) отриманню станів дискретних входів та одиничних аналогових значень – параметрів генераторів. Черга має бути створена до початку режиму моніторингу та керування обладнанням, оскільки її склад є незмінним. Для врахування пріоритетів операцій першими до черги додаються запити, пов’язані з дискретними входами. Після виконання транзакцій для всіх її елементів, запити знову додаються до черги в тому ж порядку.

3) отриманню аналогових значень – параметрів дизеля. Дані до черги додаються при відкритті вікна «Параметри дизеля», і далі, до його закриття, після виконання транзакцій для кожного елемента черги, знов додаються до неї в тому ж порядку.

4) отриманню масивів аналогових значень. Заповнення черги відбувається аналогічно заповненню попередньої.

До кожної черги запити додаються у відповідності до пріоритетів операцій (при рівних пріоритетах – в порядку створення компонентів); дисципліною обслуговування є дисципліна FIFO.

Обмін даними (обслуговування загальної черги) здійснюється циклічно. Час між двома послідовними обмінами даними має назву «Період сканування». Для ефективного використання каналу зв’язку та передбачуваного часу виконання команд (часу реакції) період сканування має бути рівним або трохи більшим за час обслуговування всіх запитів загальної черги:

$$t_{ck} \geq \sum_{i=0}^M L_i \cdot t_{обр.i} , \tag{1}$$

де  $t_{ck}$  – період сканування;

$M$  – кількість типів використаних в схемі СЕУ компонентів;

$L_i$  – довжина черги запитів компонентів  $i$ -того типу;

$t_{обр.i}$  – час обробки заявки компонента  $i$ -того типу.

Загальна черга складається з постійних та змінних елементів. Довжини черг запитів компонентів, які відповідають постійним елементам черги, є незмінними, та дорівнюють кількості вимірюваних параметрів (для елементів відображення дискретних сигналів – стани дискретних входів, для генераторів – значення напруги, струму, коефіцієнту потужності або частоти):

$$L_i = N_i , \tag{2}$$

де  $N_i$  – кількість параметрів, що вимірюється.

Довжини змінних черг запитів компонентів залежать від кількості вимірюваних параметрів компонентів, інтенсивностей вхідних потоків заявок, які формують запити, та періоду сканування:

$$L_i = N_i \cdot \lambda_i \cdot t_{ck} , \tag{3}$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність вхідного потоку заявок компонента  $i$ -го типу.

Для компоненту «Автомат» кількість параметрів, що вимірюється, співпадає з кількістю автоматів у схемі. Для генераторів середню кількість змінних параметрів, що вимірюються (миттєвих значень напруги та струму), можна визначити як середнє арифметичне:

$$N_z = \frac{2 \cdot M_{z2} + M_{z1}}{M_{z0} + M_{z1} + M_{z2}}, \tag{4}$$

де  $M_{z0}, M_{z1}, M_{z2}$  – кількості компонентів «Генератор» («Дизель-генератор»), для яких не проводяться вимірювання струму або напруги; проводяться вимірювання одного з параметрів та проводяться вимірювання обох параметрів відповідно.

Для компоненту «Дизель» середня кількість параметрів, що вимірюється, визначається виразом:

$$N_d = \frac{\sum_{i=1}^{M_d} N_i}{M_d}, \tag{5}$$

де  $M_d$  - кількість компонентів «Дизель» у схемі;

$N_i$  - кількість вимірюваних параметрів і-того компоненту «Дизель».

Час обробки запиту  $t_{обр.i}$  залежить від налаштувань параметрів обміну даними (швидкості, кількості стопових біт) та розмірів пакетів запиту і відповіді. В табл. 1 наведені розміри пакетів в байтах для кожного з компонентів, що може брати участь в обміні даними.

Таблиця 1.

Розміри пакетів даних від компонентів схеми СЕУ

Операція	Компонент	Кількість байт			Коеф.
		Запит	Відп.	Заг.	
Управління дискретним виходом	Кнопка управління, Автомат	8	11	29	1,93
Отримання стану дискр. входу	Світлодіод	8	7	15	1,00
Отримання діючого значення напруги	Генератор	8	7	15	1,00
Отримання діючого значення струму	Генератор	8	7	15	1,00
Отримання значення частоти	Генератор	8	7	15	1,00
Отримання знач. коеф. потужності	Генератор	8	7	15	1,00
Отримання миттєвих значень напруги	Генератор	8	115	123	8,20
Отримання миттєвих значень струму	Генератор	8	115	123	8,20
Отримання знач. параметрів дизеля	Дизель (один параметр)	8	9	17	1,13

Для можливості порівняння складності схем з точки зору навантаження на канал обміну даними та полегшення розрахунків для кожного параметра (операції) можна ввести ваговий коефіцієнт – відношення сумарної кількості байт запиту та відповіді до базової кількості (обирається як найменша в табл.1 – 15 байт). Тоді час обробки запиту визначається як:

$$t_{обр.i} = 1,2 \cdot k_i \cdot t_{\sigma}, \tag{6}$$

де  $k_i$  - ваговий коефіцієнт операції, відповідний параметру компонента;

$t_{\sigma}$  - час передачі елементарного пакету даних; при стандартних налаштуваннях (один стоповий біт, відсутність контролю парності) визначається виразом:

$$t_{\sigma} = \frac{150}{v},$$

де  $v$  - швидкість обміну даними, біт/с.

Коефіцієнт 1,2 введено для урахування затримок при передачі даних.

Підставивши вирази (2)–(6) до виразу (1) можна отримати залежність середнього періоду сканування від складності схеми (середнього оскільки враховуються середні довжини змінних черг):

$$t_{ск\ сеп} = 1,2 \cdot t_{\sigma} \cdot \left[ \sum_{i=1}^N M_i \cdot k_i + \left( M_{авт} \cdot k_{авт} \cdot \lambda_{авт} + \frac{2 \cdot M_{z2} + M_{z1}}{M_{z0} + M_{z1} + M_{z2}} \cdot k_z \cdot \lambda_z + \frac{\sum_{i=1}^{M_d} N_i}{M_d} \cdot k_d \cdot \lambda_d \right) \cdot t_{ск\ сеп} \right]$$

$$t_{ck\ cep} = \frac{1,2 \cdot t_{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^N M_i \cdot k_i}{1 - 1,2 \cdot t_{\sigma} \cdot \left( M_{авт} \cdot k_{авт} \cdot \lambda_{авт} + \frac{2 \cdot M_{z2} + M_{z1}}{M_{z0} + M_{z1} + M_{z2}} \cdot k_z \cdot \lambda_z + \frac{\sum_{i=1}^{M_{\delta}} N_i}{M_{\delta}} \cdot k_{\delta} \cdot \lambda_{\delta} \right)} \quad (7)$$

де  $N$  – кількість постійних параметрів, що вимірюються ( $1 \leq N \leq 5$ );  
 $M_i$  – кількість компонентів, для яких проводиться вимірювання  $i$ -того параметру;  
 $k_i$  – ваговий коефіцієнт відповідній параметру операції (кавт – «Управління дискретним виходом» для автомата;  $k_g$  – «Отримання миттєвих значень напруги (струму)» для генератора;  $k_d$  – «Отримання значень параметрів дизеля» для дизеля);  
 $M_{авт}$  – кількість компонентів «Автомат» в схемі;  
 $\lambda_{авт}$ ,  $\lambda_z$  та  $\lambda_{\delta}$  – інтенсивності вхідних потоків запитів, пов'язаних зі зміною станів дискретних виходів, отриманням миттєвих значень напруги (струму) генераторів та отриманням значень параметрів дизеля відповідно.

Використовуючи середній період сканування, можна отримати середню довжину загальної черги:

$$L_{cep} = t_{ck\ cep} \cdot \frac{\nu}{10} \quad (8)$$

Мінімальний період сканування, при якому можливий обмін даними без втрат, розраховується виходячи з середнього при граничних умовах – постійно відкритих вікнах «Параметри дизеля» (для Дизеля з максимальною кількістю параметрів, що вимірюються) та «Осцилограми» (для генератора з найбільшою кількістю миттєвих значень, що вимірюються):

$$t_{ck} \geq \frac{1,2 \cdot t_{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^N M_i \cdot k_i}{1 - 1,2 \cdot t_{\sigma} \cdot (k_{авт} + N_{z\ max} \cdot k_z + N_{\delta\ max} \cdot k_{\delta})} \quad (9)$$

де  $N_{z\ max}$  – максимальна кількість вимірюваних параметрів (миттєвих значень напруги та струму) для компонентів «Генератор»;

$N_{\delta\ max}$  – максимальна кількість параметрів, що вимірюються, для компонентів «Дизель».

При розрахунку вважається, що зміна стану більш ніж одного Автомату (або натискання на більш ніж одну Кнопку управління) за час, рівний періоду сканування, малоімовірна.

Завантаженість каналу зв'язку можна розрахувати з виразу:

$$K_{зав} = \frac{L_{cep} / t_{ck}}{\nu / 10} \cdot 100\% = \frac{10 \cdot L_{cep}}{\nu \cdot t_{ck}} \cdot 100\% \quad (10)$$

де  $t_{ck}$  – обраний період сканування.

Як приклад був розглянутий розрахунок основних характеристик системи обміну даними для схеми, наведеної на рис. 1 при наступних вихідних даних:

- швидкість обміну даними – 9600 біт/с, один стоповий біт та контроль парності відсутній;
- інтенсивність вхідного потоку заявок від автоматів та кнопок керування  $\lambda_{авт} = 2,8 \times 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> = 10 год<sup>-1</sup>;
- вимірювання діючих значень напруги, струму, частоти та коефіцієнту потужності для обох генераторів в складі Дизель-генераторів; миттєвих значень напруги та струму – тільки для першого агрегату, для другого – вимірювання лише миттєвих значень напруги з інтенсивностями вхідних потоків заявок  $\lambda_z = 0,1$  с<sup>-1</sup>;
- вимірювання трьох параметрів дизеля у складі першого компоненту Дизель-генератора, чотирьох – у складі другого; інтенсивність вхідного потоку заявок для обох дизелів складає  $\lambda_{\delta} = 0,05$  с<sup>-1</sup> = 180 год<sup>-1</sup>.

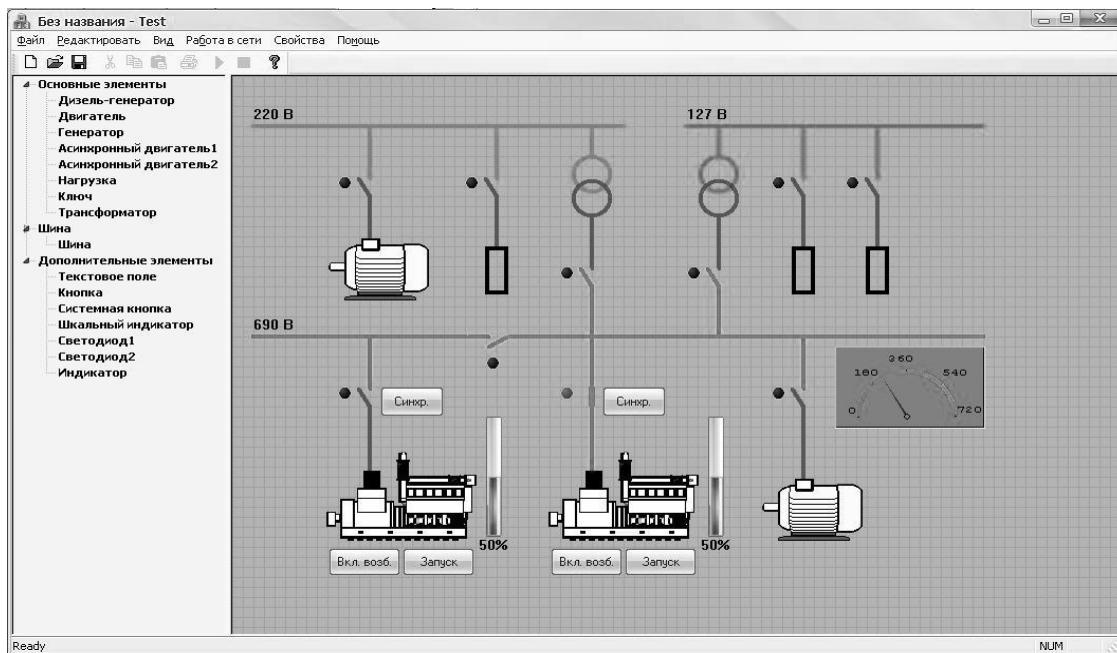


Рис. 1. Схема СЕУ, для якої виконано розрахунок основних характеристик інформаційних потоків

Мінімальне значення періоду сканування:

$$t_{ск\ min} = \frac{1,2 \cdot \frac{150}{9600} \cdot (10 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1)}{1 - 1,2 \cdot \frac{150}{9600} \cdot (1,93 + 2 \cdot 8,2 + 4 \cdot 1,13)} = 0,590 \text{ (с.)}$$

Середній період сканування:

$$t_{ск\ сep} = \frac{1,2 \cdot \frac{150}{9600} \cdot (10 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1)}{1 - 1,2 \cdot \frac{150}{9600} \cdot \left( 10 \cdot 1,93 \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} + \frac{2 \cdot 1 + 1}{1 + 1} \cdot 8,2 \cdot 0,1 + \frac{3 + 4}{2} \cdot 1,13 \cdot 0,05 \right)} = 0,328 \text{ (с.)}$$

Середня довжина пакету даних:

$$L_{сep} = 0,328 \cdot \frac{9600}{10} = 312 \text{ (біт)}$$

Важливим з практичної зору параметром системи обміну даними є мінімальне значення періоду сканування, оскільки це значення майже однозначно визначає час реакції системи на будь-яку подію. Наприклад, для розглянутої системи в разі виникнення перевантаження, програмне забезпечення зафіксує цю подію не більш ніж через 0,59 с. Стільки ж часу знадобиться для передачі команд на вимкнення споживачів електроенергії, тобто реакція системи складатиме не більш ніж 1,18 с. Це значення має бути розраховане ще на етапі проектування системи керування та оцінено експертом на допустимість. Якщо воно виявиться занадто великим, програмне забезпечення має бути розділено на декілька підпрограм, кожна з яких керуватиме окремою секцією через власний канал зв'язку. Однак для розділення загальної схеми на секції необхідно мати критерій для оцінювання залежності структури секції на завантаженість каналу зв'язку. В якості такого критерію може бути використаний інтегральний показник складності схеми:

$$K_{скл} = \sum_{i=1}^5 M_i \cdot k_i + k_{авт} + \frac{2 \cdot M_{e2} + M_{e1}}{M_{e0} + M_{e1} + M_{e2}} \cdot k_2 + \frac{\sum_{i=1}^{M_0} N_i}{M_0} \cdot k_0, \tag{11}$$

де  $M_i$  – кількість компонентів, для яких проводяться операції «Отримання стану дискретного входу» (компонент «Світлодіод»,  $i = 0$ ), «Отримання діючого значення напруги» ( $i = 1$ ), «Отримання діючого значення струму» ( $i = 2$ ), «Отримання значення частоти» ( $i = 3$ ), «Отримання значення коеф. потужності»



( $i = 4$ ; операції з  $i \in [2, 4]$  виконуються для компонентів «Генератор» та «Дизель-генератор»);

$k_i$  – вагові коефіцієнти операцій (табл. 1);

$k_{ам}$ ,  $k_2$  та  $k_d$  – вагові коефіцієнти операцій «Управління дискретним виходом», «Отримання миттєвих значень напруги (струму)», «Отримання значень параметрів дизеля» (табл. 1) відповідно;

$M_{20}$ ,  $M_{21}$ ,  $M_{22}$  – кількість компонентів «Генератор» та «Дизель-генератор», для яких не проводяться вимірювання струму або напруги; проводяться вимірювання одного з параметрів, та проводяться вимірювання обох параметрів відповідно;

$M_d$  – кількість компонентів «Дизель» у схемі;

$N_i$  – кількість вимірюваних параметрів  $i$ -того компоненту «Дизель».

**Висновки.** Основним фактором, що впливає на часові затримки при обміні даними між контролерами автоматизації та програмним забезпеченням АРМ оператора, є завантаженість каналу інформаційного зв'язку. Аналіз програмного забезпечення як одноканальної системи масового обслуговування без відмов та з пріоритетами, вхідними потоками якої є заявки від компонентів, дозволив знайти середню довжину черги запитів для обробки заявок та середній час обробки заявки, які можуть бути використані для розрахунку часу реакції системи керування як на внутрішні події СЕУ, так і на дії оператора. Розрахунок часу реакції системи керування має проводитися на етапі проектування системи і, якщо час реакції виявиться незадовільним, загальна схема має бути розділена на секції, для керування кожною з яких виділяється окремий інформаційний канал. В якості критерію для оцінювання залежності структури секції на завантаженість каналу зв'язку може бути використаний інтегральний показник складності схеми.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Гольтраф В. И. / Использование базовых технических решений в процессе автоматизации перспективных кораблей / В. И. Гольтраф // Судостроение. – 2004. – №4. – С.47–49.
2. Яковлев В. В. / Распределенные системы сбора, обработки информации и управления для задач автоматизации ЭЭС / В. В. Яковлев, Ю. М. Зайцев // Системы управления и обработки информации. – 2005. – С.44–49.
3. Khazaei H. Accuracy Evaluation of Delivered Measurements to HMI in a Real SCADA Automation System / H. Khazaei, H. Sheisi, H. Moradmand // Instrumentation Control and Automation. – 2011. – P. 279–283.
4. Luque J. Determining the channel capacity in SCADA systems using polling protocols [power system telecontrol] / J. Luque, I. Gomez, I. Escudero // IEEE Transactions on Power Systems. – 1996. – №2 – P. 917–922.
5. Голиков С. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. Конспект лекций / С. П. Голиков. – Керчь, 2012. – 205 с.
6. Пьявченко Т. А. Проектирование АСУТП в SCADA-системе: Учебное пособие / Т. А. Пьявченко. – Таганрог, 2007. – 78 с.

ДОРОГАНЬ Ольга Ігорівна, аспірант кафедри Теоретичної електротехніки та електронних систем, Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова.

Наукові інтереси: інформаційне забезпечення електроенергетичних систем, інформаційно-вимірювальні системи та математичне моделювання в електроенергетиці.