

УДК 004.3:681.418

В. М. Рябенкий, д-р техн. наук

А. О. Ушкаренко, канд. техн. наук

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова , м. Миколаїв, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ РОБОТИ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДИЗЕЛЬ-
ГЕНЕРАТОРНИМ АГРЕГАТОМ**

Выполнено исследование работы цифровой распределенной системы управления дизель-генераторным агрегатом в составе автономной электроэнергетической установки с целью оценки

влияния задержек передачи информационно-управляющих пакетов по сети на качество управления. Разработаны модели дизельного агрегата и системы возбуждения синхронного генератора с цифровыми регуляторами, реализованными в виде цифровых автоматов. Приведена структура системы управления с сетью Ethernet в контуре обратной связи и дистанционным регулятором, а также описана методика моделирования распределенных систем управления. Предложен критерий оптимизации передачи информационных пакетов по сети с целью уменьшения временных задержек и улучшения качества управления. Библ. 8, рис. 5.

Ключевые слова: дизель-генератор, система управления, цифровой регулятор, моделирование.

Виконано дослідження роботи цифрової розподіленої системи керування дизель-генераторним агрегатом у складі автономної електроенергетичної установки з метою оцінки впливу затримок передачі інформаційно-керуючих пакетів по мережі на якість керування. Розроблено моделі дизельного агрегату та системи збудження синхронного генератора з цифровими регуляторами, що реалізовані у вигляді цифрових автоматів. Приведено структуру системи керування Ethernet-мережею у контурі зворотнього зв'язку та дистанційним регулятором, та описано методику моделювання розподілених систем керування. Запропоновано критерій оптимізації передачі інформаційних пакетів по мережі з метою зменшення часових затримок та покращення якості керування. Библ. 8, рис. 5.

Ключові слова: дизель-генератор, система керування, цифровий регулятор, моделювання.

Вступ

Зростаюча складність сучасних автономних електроенергетичних систем (АЕЕС) і зростання вимог до якості електричної енергії в цих системах висуває задачу ретельного дослідження АЕЕС на різних етапах проектування. З впровадженням цифрових розподілених систем керування постало питання про забезпечення заданого рівня якості керування [4]. Ефективність роботи систем автоматичного управління у випадку значного віддалення об'єкта керування деякою мірою пов'язане з породжуваною вузлами цієї системи часовою затримкою передачі сигналу [6]. Наявність затримки найчастіше впливає на працездатність системи в цілому. Виключити затримки технічними засобами не завжди можливо. У цьому випадку на перші ролі висувається необхідність теоретичної оцінки й прогнозування затримок, а також визначення їх впливу на стійкість системи. Зростаючі обсяги оброблюваної та переданої інформації можуть призводити до появи помилкових спотворених даних, що тягне за собою невірні керуючі режими роботи всієї системи. Крім того, затримка передачі інформаційно-керуючих пакетів по мережі може призводити до погіршення якості керування збудженням генератора та обертами дизельного агрегату, що в свою чергу призведе до погіршення якості електроенергії та порушенню режиму роботи всієї енергосистеми.

У даній роботі для вивчення процесів в енергосистемах і налагодження керуючих алгоритмів застосовується комп'ютерне моделювання. В роботі [5] запропонована методика та розроблено модель дизель-генераторної установки, але не розглянуті питання керування при наявності запізнення сигналу. Для рішення поставленої задачі необхідно виконати побудову моделі дизель-генератора та їх регуляторів, між якими ввімкнена мережа як елемент передачі даних.

Основний матеріал

Часова затримка сигналу на шляху його проходження від відправника до одержувача складається з декількох частин: час на обробку в кожному вузлі, час на передачу й час на поширення сигналу. Кожний із цих етапів може бути різним по тривалості, що визначається технічним станом мережі, різними неконтрольованими випадковими причинами. В даній роботі вважається, що часова затримка τ є безперервною випадковою величиною, що має певний закон розподілу. Статистичні методи аналізу дозволяють побудувати емпіричним шляхом криву розподілу даної випадкової величини. Після того, як вона буде побудована, можна знайти наближену часову затримку як площу під кривою розподілу в даному діапазоні. Якщо вдасться аналітично описати щільність імовірності даного розподілу, то задачу про відшукування ймовірності влучення затримки в даний діапазон можна розв'язати за допомогою визначеного інтеграла:

$$P(\alpha < \tau < \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} f(\tau) d\tau,$$

де τ – часова затримка, $f(\tau)$ – щільність імовірності випадкової величини τ .

Об'єктом керування є обмотка збудження синхронного генератора та дизельний агрегат з регулятором обертів. Керування дизель-генератором відбувається через мережний інтерфейс

контролером автоматизації, в якому програмно реалізований алгоритм керування. На рис.1 представлена структурна схема розподіленої системи керування з дистанційним регулятором.



Рис.1.

Лінія затримки вносить запізнювання сигналу на величину T , яка залежить від інтервалу дискретизації ν й інтенсивності запитів λ :

$$T = f(\nu, \lambda).$$

В роботі [4] описані причини, через які інтервали вибірки при цифровому керуванні не можна вважати однаковими. Також обгрунтовано, що в такому випадку аналітичний аналіз поведінки цифрових систем керування досить складно виконати, тому прийнятним є імітаційне моделювання. Моделювання роботи систем керування виконується шляхом заміни безперервного

регулятора на цифровий, який програмно реалізований у вигляді цифрового автомату в мікроконтролері, та варіюванням часових інтервалів між зміною станів автомату. Моделі системи збудження синхронного генератора та дизельного агрегату, що розроблені у пакеті Matlab Simulink [1, 8], представлено на рис.2.

При заміні безперервних регуляторів цифровими моделі, представлені на рис.2, будуть гібридними [7], які характеризуватимуться змінним значенням запізнювання в сигналах керування. Тобто в системі керування наявний цифровий регулятор зі змінним періодом дискретизації. Передатна функція системи збудження синхронного генератора має вигляд:

$$W_{EX}(s) = \frac{K_p}{T_d s + 1} = \frac{10}{0,01s + 1},$$

де K_p – коефіцієнт підсилення, T_d – постійна часу інтегрування.

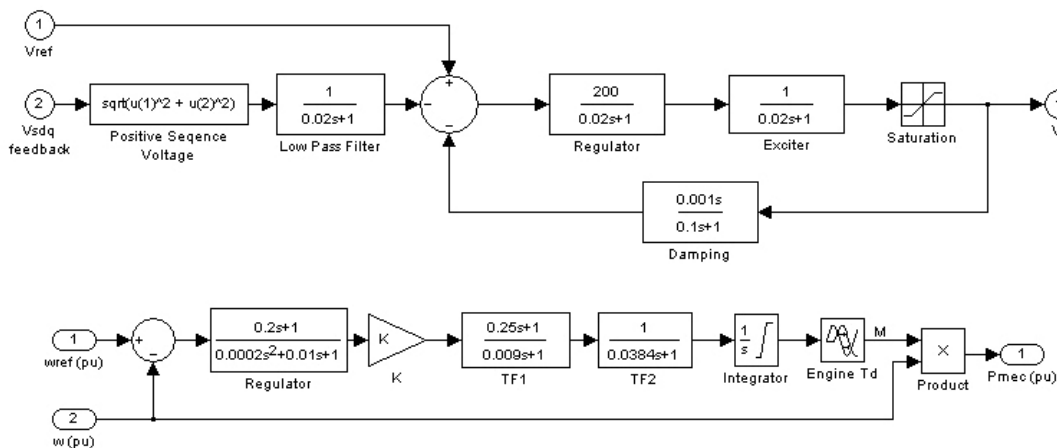


Рис.2

Реалізація цифрової системи керування збудженням генератора у вигляді діаграми станів цифрового автомату представлена на рис. 3, а.

Передатна функція системи керування дизельним агрегатом має вигляд:

$$W_{DG}(s) = \frac{K(T_0 s + 1)}{T_1 s^2 + T_2 s + 1} = \frac{40(0,2s + 1)}{0,0002s^2 + 0,01s + 1},$$

де K – коефіцієнт підсилення;
 T_1, T_2, T_3 – постійні часу регулятора.

Після виконання z-перетворення, передатна функція цифрового регулятора при періоді дискретизації 0,01 сек. має вигляд:

$$W_{DG}(z) = 40 \cdot \frac{7,437 - 7,06z^{-1}}{1 - 1,229z^{-1} + 0,606z^{-2}}$$

При зменшенні періоду дискретизації в 10 разів, передатна функція регулятора обертів дизеля приймає вигляд:

$$W_{DG}(z) = 40 \cdot \frac{0,9771 - 0,9722z^{-1}}{1 - 1,946z^{-1} + 0,9512z^{-2}}$$

На рис. 3, б, представлений граф переходів цифрового автомату, що реалізує наведений закон керування та моделюється часова затримка сигналу керування (запізнювання).

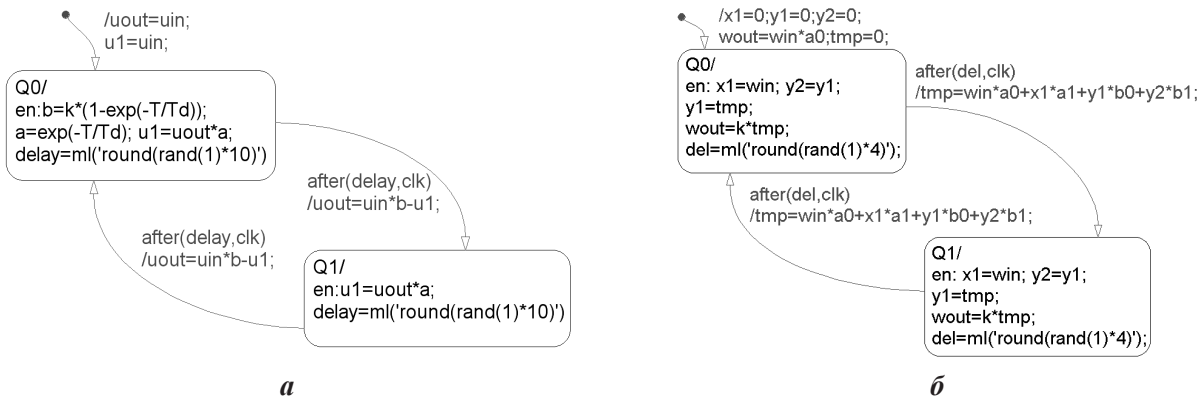


Рис. 3

Середнє значення запізнювання τ , обчислюється по формулі:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \tau_i n_i$$

У якості характеристик непостійності цього параметру приймається стандартне відхилення S і коефіцієнт варіації V_R , що обчислюються по формулах:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (\tau_i - \bar{\tau})^2 n_i},$$

$$V_R = \left| \frac{S}{\bar{\tau}} \right| \cdot 100\%.$$

Якщо коефіцієнт варіації менше 30 %, то це означає, що вибірка досить компактна, тобто часова затримка змінюється в невеликому діапазоні.

Основними показниками якості роботи регулятора, які обчислюються по перехідній характеристиці, є перерегулювання, коливальність, інтегральна оцінка [2, 3]. В роботі для оцінки якості керування використаний інтегральний показчик критерію якості керування A :

$$A = \int_0^{\infty} (h(t) - h_{cm}(t))^2 dt.$$

Залежність інтегрального показчика критерію якості керування від затримки передачі інформаційно-керуючих пакетів на віддалений регулятор системи збудження синхронного генератора представлена на рис. 3, а. Залежність інтегрального критерію якості керування від затримки передачі інформаційно-керуючих пакетів на віддалений регулятор обертів дизельного агрегату представлений на рис. 3, б.

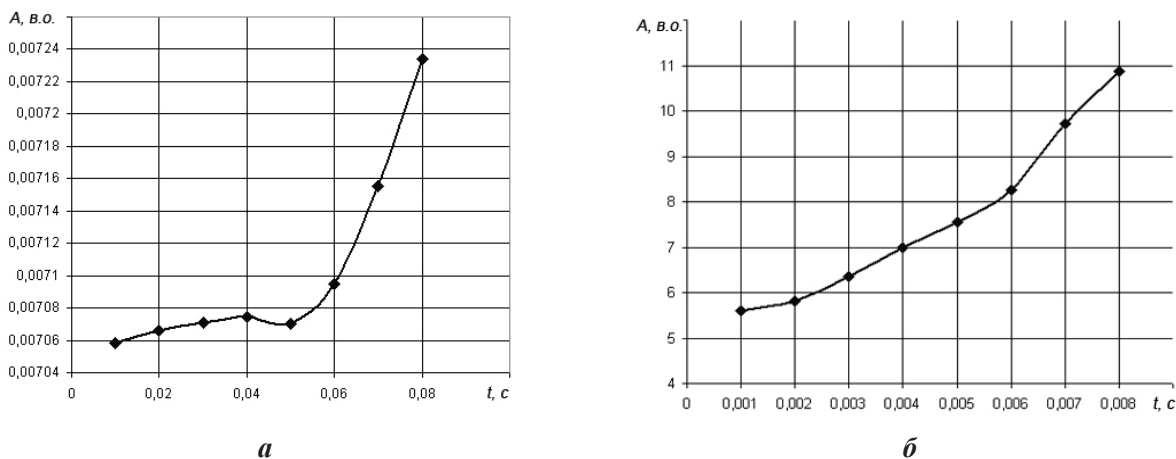


Рис. 4

Як видно з графіків, при збільшенні величини запізнювання якості керування погіршуються. Таким чином, для керування об'єктами автоматизації в режимі реального часу необхідно мінімізувати затримки передачі пакетів по мережі. Цього можна досягти пошуком оптимального маршруту передачі повідомлень, оптимізації алгоритмів обробки потоків у вузлах мережі, розподіл потоків на класи обслуговування з метою виділення найбільш пріоритетних [6]. В роботі ставиться задача мінімізації часу передачі інформаційно-керуючих пакетів по мережі.

При аналізі мережі розподіленої системи керування відома топологія мережі й пропускна здатність каналів зв'язку. Задача полягає у мінімізації часу затримки T потоку повідомлень λ_{ij} при заданих обмеженнях. Сума інтенсивностей в i -тому вузлі дорівнює:

$$\sum_j \lambda_{ij} = \lambda^i,$$

де $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$, n – число вузлів.

Позначимо

$$\lambda_k = \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^n \lambda_{ijk}$$

як інтенсивність потоку в k -тому каналі.

Час затримки виражається формулою [1]:

$$T = \sum_{k=1}^m \frac{\lambda_k}{U} \cdot \left(\frac{1}{\mu C_k - \lambda_k} \right), \quad (1)$$

де m – число каналів;

U – сумарна швидкість надходження повідомлень;

C_k – пропускна здатність k -того каналу;

$1/\mu$ – середня довжина повідомлень (у бітах).

Підставимо в (1) значення λ_k :

$$T = \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{i,j=1}^n \lambda_{ijk}}{U} \cdot \left(\frac{1}{\mu C_k - \sum_{i,j=1}^n \lambda_{ijk}} \right).$$

Введемо обмеження:

$$\sum_{k \in S_{ij}} \lambda_{ijk} - \lambda_{ij} = 0,$$

де S_{ij} – будь-який перетин графа, що розділяє i -у й j -у вершини. Причому $\lambda_{ijk} > 0$. Використовуючи відомий метод невизначених множників Лангранжа, маємо функцію Лангранжа у вигляді

$$T' = \sum_{k=1}^m \frac{\sum_{i,j=1}^n \lambda_{ijk}}{U} \cdot \left(\frac{1}{\mu C_k - \sum_{i,j=1}^n \lambda_{ijk}} \right) + \sum_{i,j=1, i \neq j}^n \sum_{S_{ij}} \gamma_{S_{ij}} \sum_{K \in S_{ij}} \lambda_{ijk} - \lambda_{ij}, \quad (2)$$

де $\gamma_{S_{ij}}$ – множник Лагранжа.

Для пошуку оптимуму диференціюємо вираз (2) і прирівнюємо до нуля.

Рівняння вирішується відносно λ_{ijk} при застосуванні чисельного методу. Інший підхід у рішенні поставленого завдання полягає в наступному. Розглядається мережа комутації пакетів. Топологія мережі описується матрицею C розміру $n \times n$, елементи якої мають значення пропускних здатностей каналів зв'язку між i -м і j -м вузлами. Матриця є симетричною з нульовими вузлами й ненегативними недиагональними елементами. Якщо $C_{ij} - C_{ji} > 0$, то існує канал зв'язку із пропускною здатністю C_{ij} біт/с, що зв'язує i -й і j -й вузли мережі. Потoki повідомлень передбачаються пуассоновськими з інтенсивностями r_i повідомлень у секунду. Середня довжина повідомлень (пакетів) у мережі дорівнює $1/\mu$. Для кожного вузла відома середня інтенсивність потоку повідомлень Y_1 . При передачі пакетів по каналу зв'язку між двома вузлами середній час очікування в черзі на обробку визначається виразом:

$$\bar{t}_{оч} = \frac{\mu}{\mu C - u} \cdot \frac{1}{\mu C},$$

де u – інтенсивність потоку повідомлень [1/с];

C – ефективна пропускна здатність каналу зв'язку [біт/сек];

$1/\mu$ – середня довжина повідомлення [біт];

Якщо i -й вузол з'єднується каналами зв'язку з іншими вузлами, то задача оптимального розподілу потоку формулюється в такий спосіб. Позначимо через u_{ij} інтенсивності потоку повідомлень із i -го вузла в j -й в [1/с]. При цьому $u_{ij} = 0$, якщо C_{ij} (немає зв'язку). Умовою існування стаціонарного режиму в мережі є виконання рівності

$$r_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (u_{ji} - u_{ij}) = y_i \quad (3)$$

і нерівності

$$\mu C_{ij} > u_{ij} \geq 0, \quad (4)$$

де r_i – інтенсивність повідомлень від i -го вузла; y_i – інтенсивність повідомлень від одного вузла до іншого, зміст якого полягає в тому, що всі повідомлення повинні знаходити своїх адресатів.

Сумарний час очікування в чергах на передачу в стаціонарному режимі мережі визначається виразом:

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \left(\frac{u_{ij}}{\mu C_{ij} - u_{ij}} \cdot \frac{1}{\mu C_{ij}} \right) \rightarrow \min \quad (5)$$

Задача оптимізації полягає у визначенні таких u_{ij} , які задовольняють обмеженням (3) і (4), і мінімізують функціонал (5). Для аналітичного рішення задачі використовується методом множників Лагранжа. Диференціюючи по тим u_{ij} , для яких $C_{ji} > 0$, одержуємо в якості необхідної умови екстремума систему алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{1}{(\mu C_{ij} - u_{ij})} + \lambda_i = 0 & i = \overline{1, n} \\ & j = \overline{1, n} \\ \sum_{i=1}^n \left(r_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (u_{ji} - u_{ij}) \right) = 0 & j \neq i \\ & C_{ij} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) вирішується чисельним методом. Атрибути, пов'язані з каналами передачі даних і ресурсами, а також параметри, асоційовані з маршрутизацією, у сукупності являють собою набір керуючих змінних, які можуть бути модифіковані для того щоб привести мережу в бажаний стан.

На рис.5 представлені осцилограми сигналів на виході цифрового регулятора при різних значеннях часо́вої затримки: 1 – часова затримка відсутня; 2 – затримка 40 мс.; 3 – затримка 80 мс.

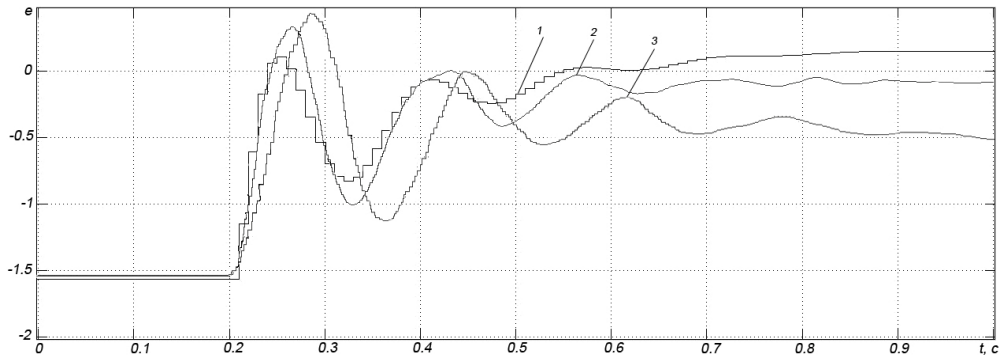


Рис.5

Заключення

Моделювання об'єкту керування припускає використання асинхронного обміну інформацією між додатками, які працюють на різних комп'ютерах. У розглянутому випадку використовується клієнт-серверна архітектура. Для керування об'єктами автоматизації в режимі реального часу необхідно мінімізувати затримки передачі пакетів по мережі. Цього можна досягти пошуком оптимального маршруту передачі повідомлень, оптимізації алгоритмів обробки потоків у вузлах мережі, розподіл потоків на класи обслуговування з метою виділення найбільш пріоритетних. При рішенні задач оптимізації інформаційних потоків необхідно виділити критерії оптимізації. До критеріїв оптимізації можна віднести величину затримки передачі пакета між двома вузлами мережі, швидкість передачі, обсяг переданих даних, завантаженість інформаційного каналу, надійність передачі даних. Однак оптимізація одного параметра може призвести до погіршення якості керування технічними засобами автоматизації АЕЕС. Оптимізація часу передачі пакетів по мережі вимагає збільшення швидкості передачі та застосування каналів із широкою смугою пропускання, а також швидкодіючих маршрутизаторів. Разом з тим, коефіцієнт завантаженості каналу передачі при цьому буде невеликим. Зменшення обсягу переданих даних, у свою чергу, може привести до погіршення якості керування. Отже при рішенні задач оптимізації необхідно враховувати всі перераховані фактори.

Список літератури

1. Дьяконов В. Математические пакеты расширения Matlab : специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.
2. Каганов В. И. Радиоэлектронные системы автоматического управления. Компьютеризированный курс / В. И. Каганов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2009. – 432 с.
3. Никульчев Е. В. Практикум по теории управления в среде Matlab: учебное пособие / Е. В. Никульчев. – М. : МГАПИ, 2002.
4. Рябенский В. М. Інформаційне забезпечення розподілених систем керування автономними електроенергетичними установками. Монографія / В. М. Рябенский, О. М. Юрченко, О. О. Ушкаренко, М. Ф. Сопель. – Київ : Інститут електродинаміки, 2012. – 208 с.
5. Рябенский В. М. Моделирование микропроцессорных систем управления газодизель-генераторными установками / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, В.И. Воскобойников // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2009, №637. – С. 78–82.
6. Рябенский В. М. Управление информационными потоками в сетях распределенных систем управления / В.М. Рябенский, А.О. Ушкаренко, А. Сулейман, А.Л. Белоконь. // Вестник ХНТУ. – Херсон : ХНТУ, 2009, №1(34). – С. 265–270.
7. Сениченков Ю. Б. Численное моделирование гибридных систем / Ю. Б. Сениченков. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2004. – 206 с.
8. Черных И. В. Simulink: Среда создания инженерных приложений / И. В. Черных. – М. : Изд-во : Диалог-МИФИ, 2004. – 496 с.

INVESTIGATION OF THE QUALITY OF THE DIGITAL CONTROL SYSTEM OF DIESEL-GENERATOR

V. M. Riabenkyi, A. O. Ushkarenko

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

The dependency of the quality of autonomous power system control on the delays evantuated from the transmission of information and control data packets is discribed by means of the analysis of the operation of the digital distributed control system of a diesel-generator. The models of the diesel and synchronous generator excitation system with the digital governors, realized as digital automata, are developed. The structure of the control system with Ethernet network in system feedback and a remote governor is developed. The technique of distributed control system simulation is discribed. The criterion of optimization of transmission of information data to increase control quality is proposed. References 8, figures 5.

Key words: diesel-generator, control system, discrete regulator, simulation.

1. *Dyakonov V.* Matlab mathematical expansion packs: special reference / *V. Dyakonov, V. Kruglov.* – SPb. : Piter, 2001. – 480 p (Rus.).
2. *Kaganov V. I.* Radioelectronic systems of automatic control. Computerized course / *V. I. Kaganov.* – M. : Gorachaya liniya-Telecom, 2009. – 432 p (Rus.).
3. *Nikulchev E. V.* Workshop on management theory in the environment of Matlab: Tutorial / *E. V. Nikulchev.* – M. : MGAPI, 2002 (Rus.).
4. *Riabenkyi V. M.* Information support autonomous distributed control systems of electric power plants. Monograph / *V. M. Riabenkyi, O. M. Yurchenko, O. O. Ushkarenko, M. F. Sopel.* – Kyiv : Institute of Electrodynamics 2012. – 208 p. (Ukr.).
5. *Riabenkyi V. M.* Simulation of microprocessor control systems of diesel-generator / *V. M. Riabenkyi, A. O. Ushkarenko, V. I. Voskoboenko* // *Visnyk of National University «Lvivska Politehnika».* – Lviv: NU «Lvivska Politehnika», 2009, № 637. – P. 78–82 (Rus.).
6. *Riabenkyi V. M.* Information management in networks of distributed control systems / *V. M. Riabenkyi, A. O. Ushkarenko, A. Suleiman, A. L. Belokon.* // *Visnyk KNTU.* – Kherson : KNTU, 2009, №1(34). – P. 265 – 270 (Rus.).
7. *Senichenkov Y. B.* Numerical simulation of hybrid systems / *Y. B. Senichenkov.* – SPb. : Izd-vo Politechn. univ., 2004. – 206 p (Rus.).
8. *Chernyh I. V.* Simulink: Environment of creation of engineering applications / *I. V. Chernyh.* – M. : Izd-vo : Dialog–MIFI, 2004. – 496 p (Rus.).