

УДК 621.314.52

С.Р.СЄЛІВЕРСТОВА, О.К.КОЛЕБАНОВ

Херсонська державна морська академія

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МІЖ СУДНОВИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

*Огляд питань розподілення потужності між паралельно працюючими генераторами в багатогенераторних системах відбувається разом з аналізом та опрацюванням питань підвищення паливної ефективності енергосистеми. Відповідно до вимог Додатків IV, VI до Протоколу 1997 р. Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню зі суден (МАРПОЛ) та положенням енергетичної ефективності морських суден, які були прийняті Комітетом по захисту морського середовища Міжнародної морської організації (ІМО МЕРС), встановлені ряд вимог щодо уникнення потрапляння нафтовмісних продуктів у морське середовище (додаток IV) та зниження обсягу викидів вуглекислого газу в атмосферу об'єктами морського транспорту (додаток VI). Відомо, що частота та напруга генератора залежить від частоти обертів дизеля та напруги збудження генератора. В свою чергу, стабільність роботи дизеля забезпечується регулюванням подачі палива. Таким чином, досягнення економічно найвигіднішого режиму роботи електроенергетичної системи з урахуванням вимог енергобезпеки, диктує необхідність організації якісної регульованої роботи силових агрегатів.*

*Моделювання мікропроцесорної системи розподілу активної потужності між генераторами суднової електроенергетичної системи проводилось за результатами аналізу процесу розподілу активної потужності між паралельно працюючими генераторами за наступними параметрами. Навантаження мережі складало активний та активно-індуктивний характер потужністю 200 кВт і 100 кВт і 200 кВт. Потужність кожного генератора 315 кВт.*

*Для дослідження перехідних процесів, які протікають в мережі після моменту синхронізації генераторів при різних умовах, використовувалась модель із двох генераторів, що створена за допомогою пакету MatLab 6.5.*

*Модель системи розподілу активної потужності представлена у вигляді цифрового скінченного автомата, який формує сигнал на зміну положення паливної рейки приводного дизельного агрегата в залежності від поточного завантаження генератора. Моделювання процесу розподілу активної потужності показало, що при зменшенні періоду тактового сигналу, що подається на цифровий автомат, в системі виникають незгасаючі коливання активної потужності між генераторами.*

*Ключові слова: суднові електроенергетичні системи, активна потужність, синхронний генератор, моделювання системи розподілу активної потужності.*

S. R. SELIVERSTOVA, O. K. KOLEBANOV

Kherson State Marine Academy

## SIMULATION OF ACTIVE POWER DISTRIBUTION SYSTEM BETWEEN SHIP GENERATORS

*The review of power distribution issues between generators operating in parallel in multigenerator systems is carried out together with the analysis and elaboration of issues of increasing the fuel efficiency of the power system. In accordance with the requirements of Annexes IV, VI to the 1997 Protocol to the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) and the provisions on energy efficiency of ships, adopted by the Marine Environment Protection Committee of the International Maritime Organization (IMO MEPC), a number of avoidance requirements release of oil-containing products into the marine environment (Annex IV) and reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere by maritime transport facilities (Annex VI). It is known that the frequency and voltage of the generator depends on the speed of the diesel engine and the excitation voltage of the generator. In turn, the stability of the diesel engine is ensured by regulating the fuel supply. Thus, the achievement of the most economically advantageous mode of operation of the power system, taking into account the requirements of energy security, dictates the need to organize high-quality regulated operation of power units.*

*Modeling of the microprocessor system of active power distribution between the generators of the ship power system was carried out based on the results of the analysis of the process of active power distribution between the generators operating in parallel according to the following parameters. The network load was active and active-inductive in nature with a capacity of 200 kW and 100 kW and 200 kW. The power of each generator was 315 kW.*

*To study the transients that occur in the network after the synchronization of generators under different conditions, we used a model of two generators, created using the package MatLab 6.5.*

*The model of the active power distribution system is presented in the form of a digital finite automatic machine, which generates a signal to change the position of the fuel rail of the drive diesel unit depending on the current load of the generator. Simulation of the process of active power distribution showed that when the period of the clock signal supplied to the digital machine is reduced, the system has unquenchable fluctuations of active power between the generators.*

*Keywords: ship power systems, active power, synchronous generator, active power distribution system simulation.*

**С.Р.СЕЛИВЕРСТОВА, А.К.КОЛЕБАНОВ**

Херсонская государственная морская академия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СУДОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**

*Обзор вопросов распределения мощности между параллельно работающими генераторами в судовых системах проводится вместе с анализом и обработкой вопросов повышения топливной эффективности энергосистемы. В соответствии с требованиями приложений IV, VI Протокола 1997 Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ) и положением энергетической эффективности морских судов, которые были приняты Комитетом по защите морской среды Международной морской организации (ИМО МЕРС), установлен ряд требований по предотвращению попадания нефтесодержащих продуктов в морскую среду (приложение IV) и снижение объема выбросов углекислого газа в атмосферу объектами морского транспорта (приложение VI). Известно, что частота и напряжение генератора зависит от частоты вращения дизеля и напряжения возбуждения генератора. В свою очередь, стабильность работы дизеля обеспечивается регулировкой подачи топлива. Таким образом, достижение экономически выгодного режима работы электроэнергетической системы с учетом требований энергобезопасности, диктует необходимость организации качественной регулируемой работы силовых агрегатов.*

*Моделирование микропроцессорной системы распределения активной мощности между генераторами судовой электроэнергетической системы проводилось по результатам анализа процесса распределения активной мощности между параллельно работающими генераторами по следующим параметрам. Нагрузка сети носила активный и активно-индуктивный характер мощностью 200 кВт и 100 кВт и 200 кВт. Мощность каждого генератора 315 кВт.*

*Для исследования переходных процессов, протекающих в сети после момента синхронизации генераторов при различных условиях, использовалась модель из двух генераторов, созданная с помощью пакета MatLab 6.5.*

*Модель системы распределения активной мощности представлена в виде цифрового конечного автомата, который формирует сигнал на изменение положения топливной рейки приводного дизельного агрегата в зависимости от текущей загрузки генератора. Моделирование процесса распределения активной мощности показало, что при уменьшении периода тактового сигнала, подаваемого на цифровой автомат, в системе возникают незатухающие колебания активной мощности между генераторами.*

*Ключевые слова: судовые электроэнергетические системы, активная мощность, синхронный генератор, моделирование системы распределения активной мощности.*

### **Постановка проблемы**

Сучасні суднові електроенергетичні системи в своєму складі мають декілька генераторних агрегатів. Якісне розподілення потужності між паралельно працюючими генераторами неможливе без підвищення паливної ефективності енергосистеми. Характер розподілення активної та реактивної потужностей є наслідком якості параметрів електроенергії, що виробляється генераторними агрегатами. Частота та напруга генератора залежить від частоти обертів дизеля та напруги збудження генератора. В свою чергу, стабільність роботи дизеля забезпечується регулюванням подачі палива. Таким чином, досягнення економічно найвигіднішого режиму роботи електроенергетичної системи диктує необхідність організації регульованої паралельної роботи силових агрегатів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Генераторні агрегати в судновій електроенергетичній системі об'єднані на паралельну роботу електричними мережами [1, 3]. Економічність режиму роботи суднової електроенергетичної системи визначається не тільки сумарною витратою палива, але й втратами потужності у електричних мережах [4]. Судновим електроенергетичним системам притаманні ряд відмінностей, порівняно з автономними наземними електростанціями. Порівняно невелика довжина кабельних мереж зумовлює зростання швидкодії плинності процесів передачі, зміни, відгуків, перешкод, коротких замикань у ланцюгах судових мереж. Ці відмінності впливають на характер статичних та динамічних процесів, що спостерігаються в електроенергетичній системі [1, 2]. Разом з тим, короткі кабельні лінії силової суднової мережі не обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів в перехідних процесах, що відбуваються в електроенергетичних установках. Розподілення активного та реактивного навантаження між паралельно працюючими генераторами при підключенні судових споживачів великої потужності до розподільчих мереж багатогенераторної системи призводять до більш складних перехідних процесів з ризиком знеструмлення електроенергетичної системи [3, 5].

У наукових працях, які присвячені дослідженню вказаних процесів в судових електроенергетичних системах, виконуються розрахунки процесів в різних експлуатаційних та аварійних режимах. Визначаються струми, моменти в елементах електроенергетичної системи, напруга та частота мережі, тривалість динамічних процесів та умови стійкості і надійності системи, розраховуються налагоджувальні параметри систем регулювання та захисту [4, 8].

Одним із способів вирішення цих складних завдань є використання методів математичного моделювання, які дозволяють розраховувати характеристики електроустановок в перехідних та сталих режимах [6].

### Мета дослідження

Метою роботи є дослідження процесу розподілу активної потужності між генераторами та моделювання мікропроцесорної системи, яка в умовах роботи суднової електроенергетичної системи виконує функції розподілу активної потужності між генераторами.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження перехідних процесів, які протікають в мережі після моменту синхронізації генераторів при різних умовах, використана модель із двох генераторів, що створена за допомогою пакету MatLab 6.5. Її вигляд приводиться на рис.1.

Модуль 3-Phase Breaker моделює роботу автомата, що підключає один генератор до другого. Навантаження мережі складає активний та активно-індуктивний характер потужністю 200 кВт і 100 кВт і 200 кВт. Потужність кожного генератора дорівнює 315 кВт. Після процесу автоматичної точної синхронізації генераторів в роботу вступає система розподілення активної потужності, що представляє собою цифровий скінченний автомат.

Якщо включення синхронної машини в мережу відбувається в той момент, коли стала частота її обертання менше синхронної, то машина буде працювати відразу ж після включення в режимі синхронного двигуна, споживаючи з мережі активну потужність.

Якщо включення синхронної машини в мережу відбувається при частоті обертання вище синхронної, то вона буде працювати в режимі синхронного генератора, віддаючи активну потужність у мережу. У тому та іншому випадку активна потужність, що віддається або споживається синхронною машиною, визначається ступенем

нерівномірності автоматичного регулятора частоти обертання первинного двигуна й співвідношенням частот генераторів, що синхронізуються. На першому циклі коливань агрегат з більшою частотою обертання приймає на себе основну частину активного навантаження системи, розвантажуючи генератор, що працює на зміщеній вниз статичній частотній характеристиці. Процес перерозподілу навантажень закінчується протягом 0,2-0,3 с. Починаючи з деякої вихідної різниці частот, (близько 2,5% при нахилі частотних характеристик 3%), у системі з меншою вихідною частотою обертання спостерігається перехід генератора в режим двигуна. Відповідно до цього, при підвищенні різниці частот спостерігається збільшення провалів частоти на стороні генератора, що має більшу вихідну частоту обертання.

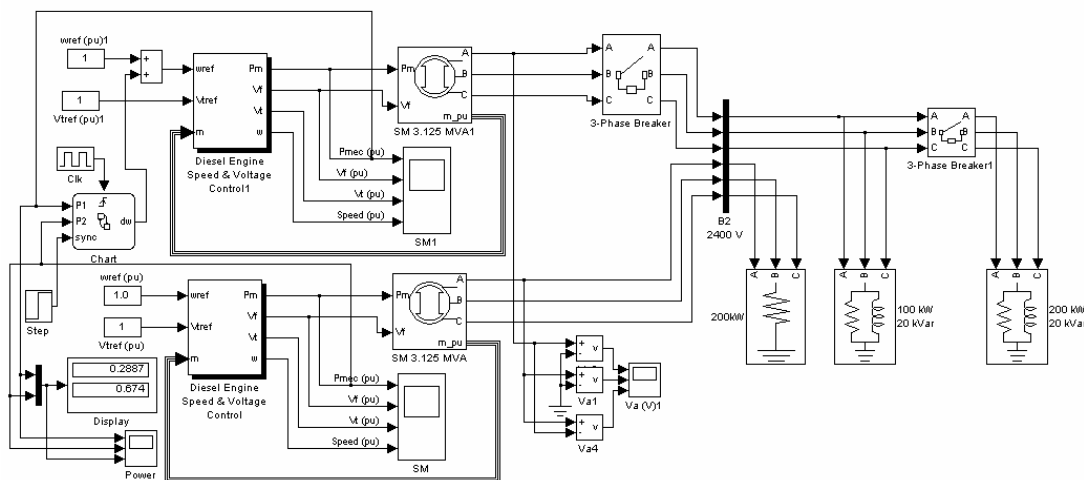


Рис. 1 – Модель електростанції з двома синхронними генераторами (моделювання у MatLab)

Вхідними параметрами блоку, що моделює синхронний генератор, є механічна потужність, що розвиває приводний дизель, та напруга збудження. Роботу дизель-генератора та системи збудження генератора моделює блок Diesel Engine. Його структурна схема приводиться на рис.2.

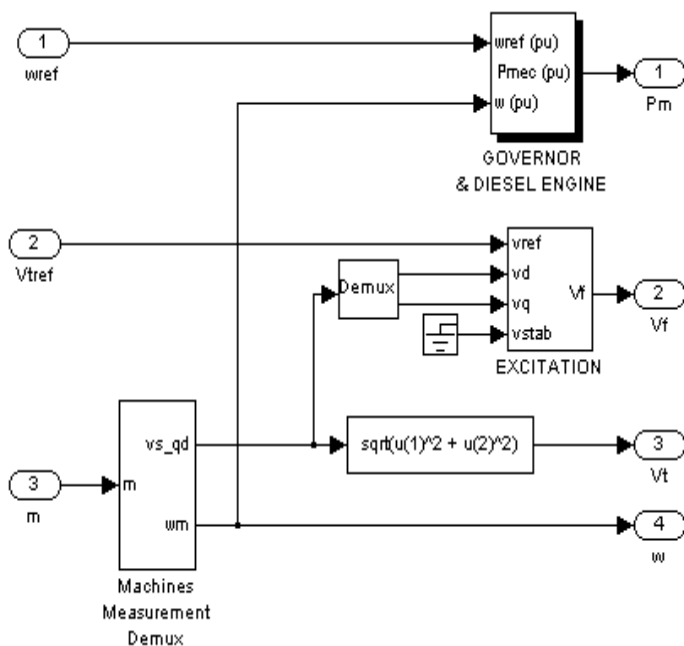


Рис. 2 – Структурна схема блоку Diesel Engine

Цей блок складається з моделі дизеля та його системи керування (Governor & Diesel Engine), блоку збудження генератора (Excitation), блоку вимірювання параметрів синхронного генератора (Machines Measurement Demux). Вхідними параметрами цього блоку є сигнал, що задає швидкість дизеля, напругу збудження, напругу статора та поточну швидкість обертання генератора. В регуляторі швидкості дизеля задаються такі параметри, як коефіцієнт підсилення (40), постійні часу, які враховуються в передаточній функції генератора, мінімальний та максимальний вихідний сигнали, час затримки регулятора. Передаточна функція системи керування приводом має вигляд:

$$W_p(s) = 40 \cdot \frac{(1 + 0.2s)}{(1 + 0.01s + 0.02s^2)} \quad (1)$$

Передаточна функція приводу має вигляд:

$$W_n(s) = 40 \cdot \frac{(1 + 0.25s)}{s \cdot (1 + 0.009s)(1 + 0.0384s)} \quad (2)$$

Коефіцієнт підсилення та постійна часу регулятора збудження дорівнюють відповідно 200 та 0,02с.

### Результати моделювання

Суднова електроенергетична установка й система розподілу активної потужності, що використовується в ній, відноситься до гібридних систем. Всі ці системи складаються з аналогових та дискретних компонентів. Тому гібридні системи – це системи зі складною взаємодією дискретної та безперервної динаміки. Вони характеризуються не тільки безперервною зміною стану системи, але й стрибкоподібними варіаціями відповідно до режиму роботи (комутація навантаження, зміна кількості генераторів, що працюють).

У тому випадку, коли логіка роботи керуючої підсистеми є незмінною, а зовнішні умови відносно стабільні, говорять про трансформаційні системи. Для таких систем фази одержання інформації, її обробки та видачі вихідних сигналів чітко розмежовані. На момент звертання до системи всі вхідні сигнали визначені. Сигнали на виходах встановляться після деякого періоду обчислень. Обчислення виконуються по деякому алгоритму, що трансформує (перетворює) вхідний набір даних у вихідний. У протилежному випадку систему відносять до класу керованих подіями або реактивних. Реактивна – це така динамічна система, що сприймає зовнішні дискретні впливи й відповідає своїми реакціями на ці впливи. Причому реакції системи різні й залежать як від впливів, так і від стану, у якому система перебуває. Основна відмінність реактивних систем від трансформаційних – у принциповій непередбачуваності моментів надходження тих або інших сигналів. Ця непередбачуваність – наслідок зміни умов, у яких такі системи працюють.

Розглянута система розподілу активної потужності в складі суднової електроенергетичної установки відноситься до реактивних систем. Моделювання енергетичних процесів (безперервна складова поведінки системи) доповнюється моделюванням логіки роботи керуючих ними пристроїв (дискретний компонент). Математичний апарат опису в цьому випадку – це система рівнянь, але не диференціальних, а алгебраїчно-логічних. Для моделювання дискретної динаміки реактивних систем широко використовується запропонований Д. Харелом візуальний формалізм – Statechart (діаграми станів і переходів) [7]. Основні неграфічні компоненти таких діаграм – це подія і дія, основні графічні компоненти – стан і перехід. На основі діаграми станів можлива реалізація керуючої програми для мікроконтролера системи

розподілу активної потужності (РАП). Таким чином, представлення системи РАП у вигляді цифрового скінченного автомата дозволяє виконати моделювання роботи системи РАП у складі електроенергетичної системи, а також розробити програму для керуючого мікроконтролера.

На рис. 3 представлені осцилограми зміни активної потужності в електроенергетичній системі при відключеному пристрої розподілу активної потужності, після синхронізації генераторів при роботі на загальне навантаження потужністю 300 кВт.

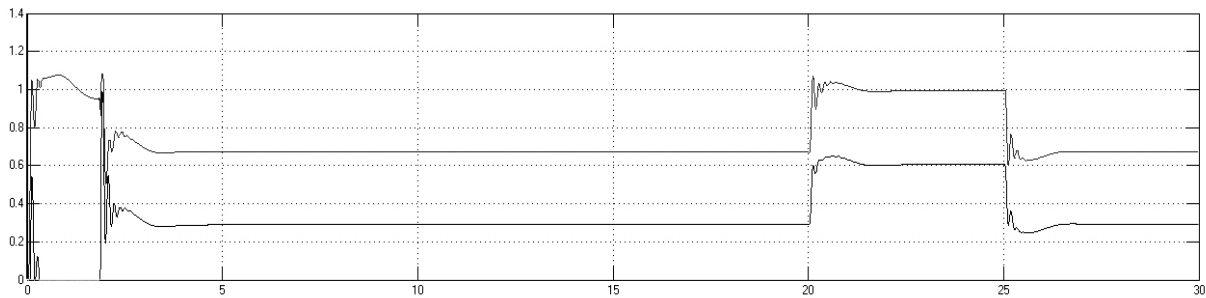


Рис. - 3. Осцилограми зміни активної потужності без роботи системи розподілення активної потужності

Після включення генераторів на паралельну роботу активна потужність між ними розподіляється нерівномірно й цей розподіл залежить від умов синхронізації (різниця фаз, частот і напруг у момент замикання контактів автоматичного вимикача) які, як правило, є випадковими. Як видно з рис. 3, після синхронізації генераторів перший генератор завантажений на 29%, другий на 67%. У момент часу  $t=20$ с відбувається підключення споживача електроенергії потужністю 200 кВт. При цьому завантаження кожного з генераторів дорівнює відповідно 61% й 103%. Таким чином, моделювання показало, що при відсутності пристрою розподілу активної потужності завантаження генераторів відбувається випадковим чином, при цьому можлива ситуація, коли один з генераторів буде перевантажений, незважаючи на те, що в системі є резерв потужності, що генерується. Для забезпечення пропорційного розподілу потужності між генераторами розроблений цифровий автомат, що моделює роботу системи РАП. На рис. 4 представлений граф переходів розробленого автомата.

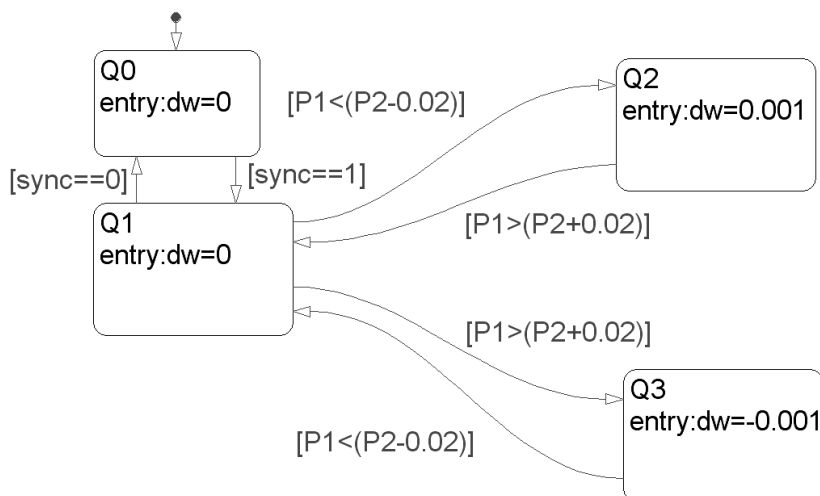


Рис. 4. - Граф переходів автомата, що моделює систему

У стані  $Q0$  автомат перебуває доти, поки не виконається синхронізація автомата. Сигнал на замикання автоматичного вимикача є подією, що викликає перехід автомата зі стану  $Q0$  у стан  $Q1$ . У стані  $Q2$  автомат формує на виході  $dw$  сигнал зміни положення паливної рейки, що відповідає збільшенню подачі палива, і, як наслідок, набір активної потужності. У стані  $Q3$  автомат формує на виході  $dw$  сигнал зміни положення паливної рейки, що відповідає зменшенню подачі палива, і, як наслідок, скидання активної потужності. Автомат буде перебувати в одному зі станів ( $Q2$  або  $Q3$ ) доти, поки активні потужності кожного з генераторів не стануть рівними, або не будуть лежати в деякому діапазоні, що відповідає припустимій нерівномірності розподілу активної потужності між генераторами. Автомат є синхронним, оскільки це відповідає реальній роботі пристрою розподілу активної потужності, а вихідні сигнали керування – це імпульсні сигнали на збільшення/зменшення обертів дизеля. На рис. 5 представлені осцилограми зміни активної потужності між генераторами при роботі пристрою.

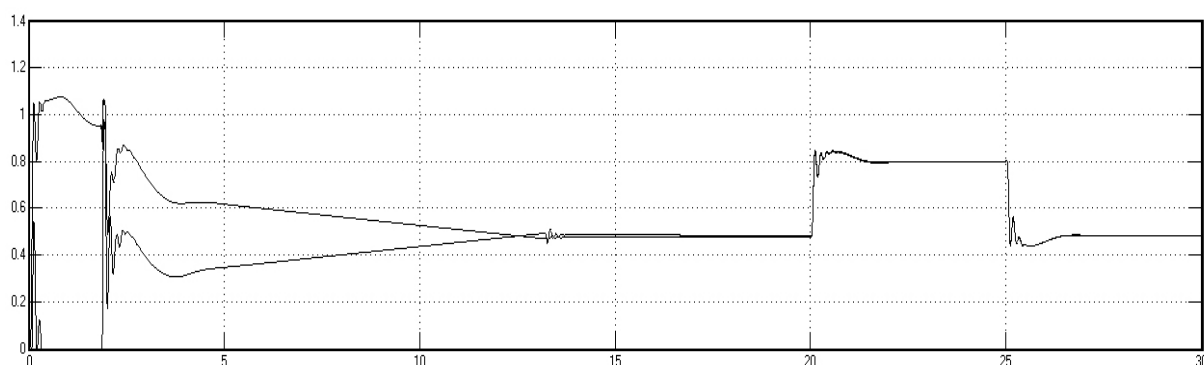


Рис. - 5. Осцилограми зміни активної потужності при роботі системи розподілення активної потужності

При зменшенні періоду тактового сигналу цифрового автомата пристрою РАП в енергосистемі виникають коливання активної потужності при паралельній роботі генераторів, тобто система стає нестійкою. На рис. 6 представлені осцилограми коливань активної потужності між генераторами.

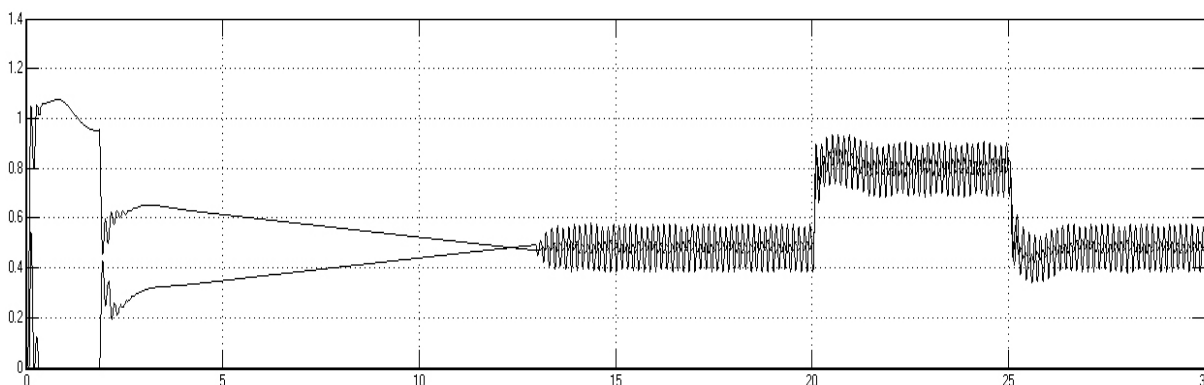


Рис. 6 – Осцилограми зміни активної потужності при роботі системи розподілення активної потужності при зменшенні періоду тактового сигналу автомата

### Висновки

У роботі виконано розробку моделі електроенергетичної системи для моделювання процесу розподілу активної потужності між генераторами. Модель системи розподілу активної потужності представлена у вигляді цифрового скінченного автомата, який формує сигнал на зміну положення паливної рейки приводного

дизельного агрегата в залежності від поточного завантаження генератора. Представлення системи розподілу активної потужності у вигляді автомата дозволяє розробити програмне забезпечення для мікроконтролера з використанням switch-технології. Моделювання процесу розподілу активної потужності показало, що при зменшенні періоду тактового сигналу, що подається на цифровий автомат, в системі виникають незгасаючі коливання активної потужності між генераторами.

#### Список використаної літератури

1. Вишнеvский Л.В. Тумольский А.П.Согласованное управление автономной электроэнергетической установкой. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. № 19 (95). С.150–153.
2. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. Санкт Петербург: Судостроение, 2005. 528 с.
3. Woud H.K., Stapersma D. Design of propulsion and electric power generation systems. London: IMarEST Publications, 2003. 494 p.
4. Юшков Є.О. Моделювання режимів роботи суднової енергетичної установки комбінованого пропульсивного комплексу із системою керування на основі електронних регуляторів. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 6. С.39–44.
5. Вишнеvский Л. В., Веретенник А. М., Войтецкий И. Е. Выбор критерия для оценки процесса включения генераторов на параллельную работу. *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. Херсон. 2007. №2. С. 136–139.
6. Муха Н.И. Перспективная компоновка судовых автономных электроэнергетических систем. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2017. №27 (1249). С.285–288.
7. D.Harel Statecharts. A visual formalism for complex systems. *Science of computer programming*. 1987. 8. P. 231–274.
8. Дранкова А. О., Муха Н. И., Шестака А. И. Лаборатория микроконтроллерного управления и моделирования электромеханических систем. *Электротехнические и компьютерные системы. Научно-технический журнал*. – Київ: Техніка, 2014. №15(91). С. 435–440.

#### References

1. Vishnevskij, L.V., & Tumolskij, A.P. (2015). Soglasovannoe upravlenie avtonomnoj elektroenergeticheskoy ustanovkoj. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy*. **19** (95), 150–153.
2. Baranov, A. P. (2005). Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy. Sankt Peterburg: Sudostroenie.
3. Woud, H.K., & Stapersma, D. (2003). Design of propulsion and electric power generation systems. London: IMarEST Publications.
4. Yushkov, Ye.O. (2016). Modelyuvannya rezhimiv roboti sudnovoyi energetichnoyi ustanovki kombinovanogo propulsivnogo kompleksu iz sistemoyu keruvannya na osnovi elektronnikh regulyatoriv. *Elektrotekhnika i elektromekhanika*. **6**, 39–44.
5. Vishnevskij, L. V., Veretennik, A. M., & Vojteczkij, I. E. (2007). Vy`bor kriteriya dlya ocenki proczessa vklyucheniya generatorov na parallel`nyu rabotu. *Avtomatika. Avtomatizacziya. E`lektrotekhnicheskie komplekсы` i sistemy`*. Kherson. **2**, 136–139.
6. Mukha, N.I. (2017). Perspektivnaya komponovka sudovykh avtonomnykh elektroenergeticheskikh system. *Visnik Naczionalnogo tekhnichnogo universitetu «Kharkivskij politekhnichnij institut»*. **27**(1249), 285–288.



7. D.Harel (1987). Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Science of computer programming*, **8**, .231–274.
8. Drankova, A.O., Mukha, N. I., & Shestaka A. I. (2014). Laboratoriya mikrokontrollernogo upravleniya i modelirovaniya elektromekhanicheskikh sistem. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy. Nauchno-tekhnicheskij zhurnal*. Kiyiv: Tekhnika. **15**(91), 435–440.

Селіверстова Світлана Ростиславівна - к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: ussr28031972@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1015-1593.

Колебанов Олександр Костянтинович - к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: kolebanovkak@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9618-9105.