

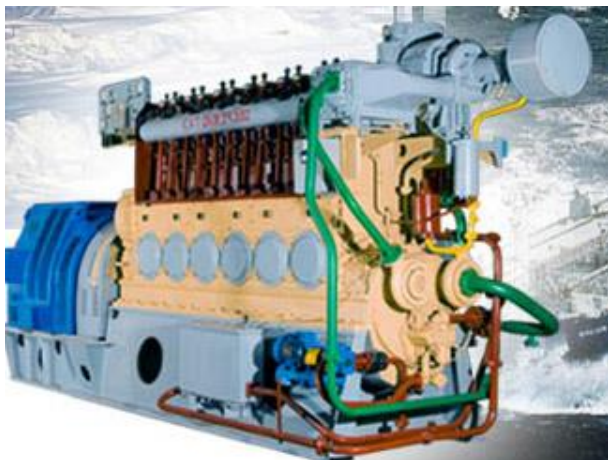


УДК 621.436:006.354
№ДР 0124U001522

Міністерство освіти і науки України

Назва проекту:

**Розробка енергоефективних засобів
генерації та перетворення електроенергії для
систем розмагнічування малих кораблів**



Науковий керівник:

д-р. техн. наук, проф. Г.В. Павлов



ПРЕДМЕТ ТА МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета проєкту - розробка енергоефективних засобів генерації та перетворення електроенергії, що забезпечать надійну роботу систем розмагнічування малих кораблів.

Об'єкт дослідження - апаратно-програмне забезпечення для суднових автоматизованих систем керування процесами генерування та перетворення електроенергії, впровадження яких забезпечить високу якість електроенергії, надійне та безперебійне живлення споживачів електроенергії в мережі суднових електроенергетичних систем та підвищить її енергоефективність.

Предмет дослідження - теоретичні та прикладні принципи побудови суднових автоматизованих систем керування, методи та засоби автоматизації процесів керування генеруванням та перетворенням електроенергії в суднових електроенергетичних системах, методи підвищення енергоефективності, покращення якості електроенергії.

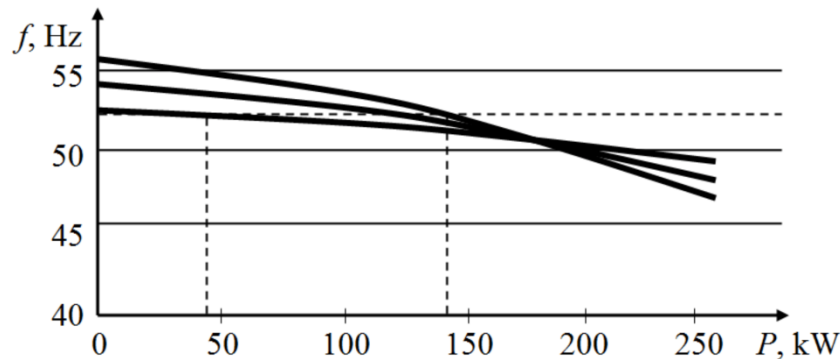
Методи досліджень - методи системного аналізу, метод статистичного аналізу даних, методи теорії випадкових процесів, метод активного експерименту, методи теорії кінцевих автоматів та логічних схем алгоритмів, імітаційне та комп'ютерне моделювання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПРОЕКТУ

- ❑ визначено статистичні характеристики збурень, можливий діапазон обмінних коливань активної потужності в АЕЕС на основі експериментальних даних та визначено заходи по покращенню якості електроенергії та підвищенню енергоефективності АЕЕС. Розроблено структуру системи керування ДГА, що забезпечує автоматичний пошук оптимальних коефіцієнтів ПІД-регулятора, і знижує на 15-20% дисперсію коливань обертів вала ДГА, що дозволило відмовитися від використання низькочастотних пасивних фільтрів у корабельній електромережі та знизити масу обладнання приблизно на 10 кг на кожен кВт встановленої потужності;
- ❑ розроблено новий метод визначення оптимальної комбінації номінальних потужностей судових ДГА, який базується на статистичному аналізі діаграми навантаження з урахуванням СР, для підвищення енергоефективності АЕЕС шляхом забезпечення роботи ДГА в режимах з найвищим ККД і зменшення витрати палива на 3-5%. Розроблено новий метод створення та структурної оптимізації апаратно-програмних засобів автоматизації АЕЕС, що дозволило зменшити масо-габаритні показники та кінцеву вартість корабельного електрообладнання за рахунок перенесення частини виконуваних функцій на програмний рівень;
- ❑ набув подальшого розвитку метод керування корабельними ДГА для забезпечення їх запуску та енергоефективної роботи в паралельному режимі, який враховує нелінійні характеристики ДГА за рахунок використання апарату нечіткої логіки при формуванні сигналів керування. Разом із запровадженням контролю моментів і кутових положень роторів силових агрегатів, це дозволило зменшити на 15-20% величини коливань реактивної потужності, та зберігати від 2 до 5% електроенергії. Система упереджувального керування вихідними параметрами СГ забезпечує підвищену стабільність струмів і магнітних характеристик СР;
- ❑ набув подальшого розвитку метод проектування ПЗ для АСК корабельними АЕЕС шляхом інтеграції дискретно-детермінованих моделей програмних компонентів з UML-діаграмами станів, що, завдяки формалізованому опису алгоритмічної поведінки на основі теорії цифрових автоматів, забезпечує передбачуваний та систематичний перехід від вимог до програмного коду, впроваджує ієрархічну та модульну перевірку, скорочує тривалість тестування на 30-40% і підвищує надійність, масштабованість та ефективність ПЗ для автоматизації процесів генерування та перетворення електроенергії в судових АЕЕС.
- ❑ отримав розвиток метод ковзаючих перехідних функцій для побудови статичних та динамічних моделей резонансного перетворювача;
- ❑ розроблено лінеаризовану динамічну та статичну моделі резонансного перетворювача. В операторній формі вона моделі можливість визначити частинні передатні функції лінійного пасивного багатополосника, що є складовими динамічної моделі резонансного перетворювача;
- ❑ отримана динамічна модель резонансного перетворювача для амплітудної модуляції описує взаємозв'язок значень напруги живлення і вихідних величин в моменти початку кожного робочого циклу резонансного перетворювача;
- ❑ розроблено адаптивний дискретний ПІД-регулятор напруги і струму навантаження резонансного перетворювача, який змінює основні коефіцієнти регулювання та період дискретності в залежності від сигналу похибки регулювання. Розроблено схему та програмне забезпечення нелінійного адаптивного цифрового регулятора вихідної напруги резонансного перетворювача.

Статистичні характеристики збурень та можливий діапазон обмінних коливань потужності в АЕЕС

Параметр	Середнє, f_{avg} , Гц	Максимальне, f_{max} , Гц	Мінімальне, f_{min} , Гц
Навантаження			
100 кВт	50.55	55.3	46.62
150 кВт	50.02	51.29	48.78
200 кВт	49.73	51.03	48.64



Максимальне і мінімальне значення статизму:

$$\delta_{\min} = \frac{1,052 - 1,03}{0,2} = 0,11 \quad \delta_{\max} = \frac{1,122 - 1,078}{0,2} = 0,22$$

Нерівномірність розподілу активної потужності:

$$\nu_p = \frac{165 - 45}{165 + 45} \cdot 100\% = 57,1\%$$

Метод визначення оптимальної комбінації номінальних потужностей ДГА

1. Розрахунок максимального навантаження СЕЕС та формування усередненої добової потужності:

$$P_i = \max_{j \in [1; m \cdot n]} \sum_{i=1}^g P_j^i \quad \bar{P}_i = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^g P_{j,i}^k}{m} \quad \text{для } i \in [1, n]$$

2. Формування множини можливих комбінацій номінальних потужностей ДГА:

$$c = \sum_{i=1}^{c_{\max}} c_i, \text{ де } c_{\max} = \frac{P_{\max} - g \cdot P_{\min}^1}{\Delta P^1} + 1 \quad \text{і } c_i = c_{\max} - (i - 1)$$

3. Розрахунок кортежів $P_{\text{ном}}$ ДГА $\langle P_k^1, P_k^2, P_k^3, \dots \rangle$

$$P_k^1 = P_{i,j}^1 = P_{\min}^1 + i \cdot \Delta P^1, \quad P_k^2 = P_{i,j}^2 = P_{\min}^1 + j \cdot \Delta P^1, \dots$$

4. Розрахунок середнього відхилення завантаженості ДГА від номінальної завантаженості (0,75):

$$\overline{\Delta k_k} = \frac{1}{g \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^n \left| \frac{P_j^i}{P_i^1} - 0,75 \right| \quad \bar{t}_k = \frac{1}{g} \cdot \sum_{i=1}^g \text{count} (P_j^i > 0)$$

5. Вибір потужності ДГА у відповідності до критерію:

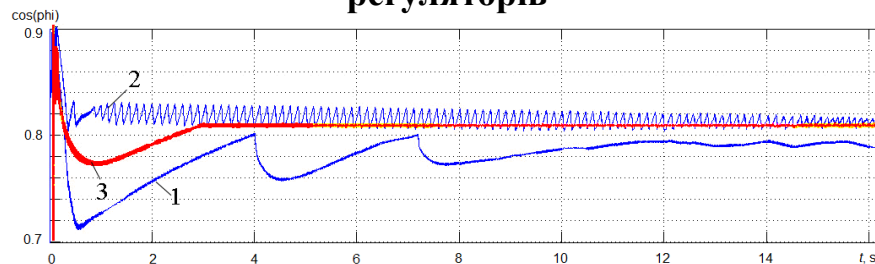
$$\max_{t_k} \min_{\Delta k_k} \langle P_k^1, P_k^2 \dots P_k^i \rangle, \bar{t}_k, \overline{\Delta k_k}$$

Забезпечення роботи ДГА в режимах, близьких до оптимальних, дозволяє на 3-5% зменшити витрати палива

**Графоаналітична модель системи керування
корабельними дизель-генераторними агрегатами
для забезпечення їх запуску та енергоефективної
роботи в паралельному режимі**

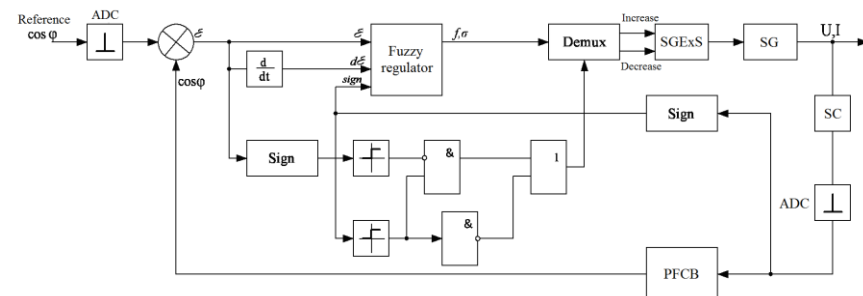
$$\begin{aligned} & \mathbf{I}_{\text{out}} \rightarrow f(\mathbf{I}_{\text{out}, \Delta \mathbf{I}_{\text{out}}}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} = [\mathbf{I}_j]_{\text{out}} \uparrow \\ f_1(\text{ADC}) = [\mathbf{I}_j]_{\text{out}} = \\ [\mathbf{U}_j] \rightarrow \end{array} \right\} f_\phi(\Sigma) = [\mathbf{U}_j]_{\Delta t} f(\mathbf{U}, \mathbf{I}_{\text{out}}, \downarrow \uparrow^0) \uparrow \\ & [\mathbf{U}_j] \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} = [\mathbf{U}_j]_{\text{out}} = \\ f_2(\text{ADC}) \end{array} \right\} \\ & \mathbf{U}_{\text{out}} \rightarrow f(\mathbf{U}_{\text{out}, \Delta \mathbf{U}_{\text{out}}}) \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} = [\mathbf{U}_j]_{\text{out}} = \\ f_1(\text{Sign}) \end{array} \right\} = (+\mathbf{U}^{L_1}/-\mathbf{U}^{C_1}) \uparrow \\ & \quad \downarrow [\mathbf{I}_j]_{\text{out}} = \left\{ \begin{array}{l} = \underline{\&}_1 = \\ \downarrow(+\mathbf{U}^{L_1}/-\mathbf{U}^{C_1}) = 1 \\ \&_1 = \end{array} \right\} \\ & \quad \downarrow [\mathbf{U}_j]_e = f_2(\text{Sign}) \left\{ \begin{array}{l} = (+\mathbf{U}^{L_2}/-\mathbf{U}^{C_2}) = \end{array} \right\} \\ & \quad \downarrow [\mathbf{U}_j]_{\Delta t} f(\mathbf{U}, \mathbf{I}_{\text{out}}, \downarrow \uparrow^0) = \left\{ \begin{array}{l} = [\mathbf{U}_j]_e \uparrow \\ f_1(\Sigma) \\ f_3(\text{ADC}) = [\mathbf{U}_j]_{\cos \phi} = \end{array} \right\} \downarrow [\mathbf{U}_j]_e = \left\{ \begin{array}{l} = f(d/dn) = [\mathbf{U}_j]_{de} = \end{array} \right\} \\ & \quad [\mathbf{U}_j] \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} = [\mathbf{U}_j]_{\cos \phi} = \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} = f(\text{Fuzzy}) = \mathbf{U}(\Delta t, T) = \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} = f(\text{Demux}) = \left\{ \begin{array}{l} = \mathbf{U}_{\phi 1.n} (\pm \Delta t_{n+1}) \\ = \mathbf{U}_{\phi 2.n} (\pm \Delta t_{n+1}) \\ = \mathbf{U}_{\phi 3.n} (\pm \Delta t_{n+1}) \end{array} \right. \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Осцилограми зміни $\cos\phi$ для різних типів регуляторів

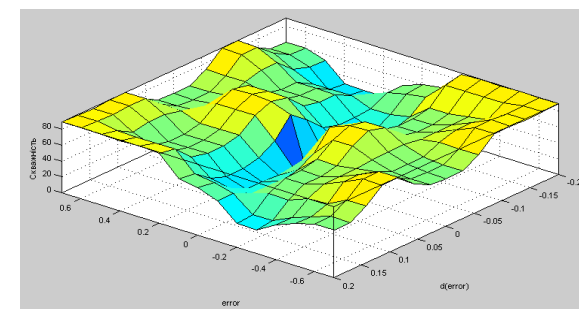
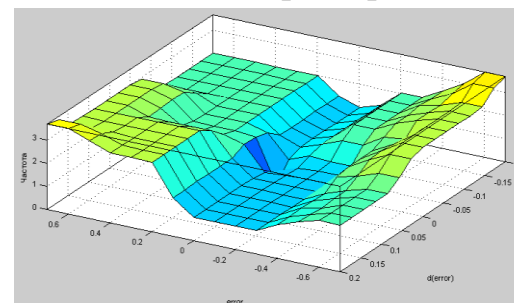


1 – трипозиційний регулятор; 2 – ПД-регулятор;
3 – Fuzzy-регулятор.

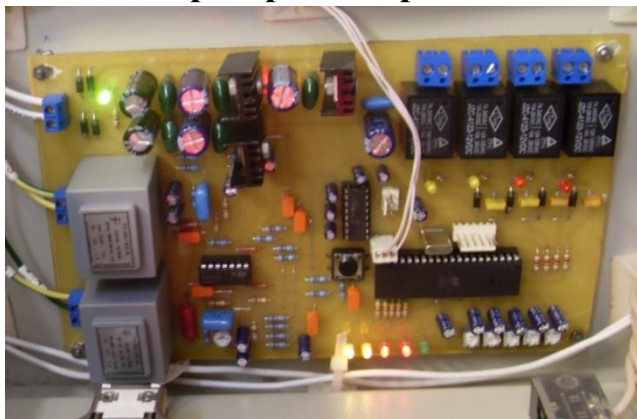
Функціональна схема системи з регулятором на основі нечіткої логіки



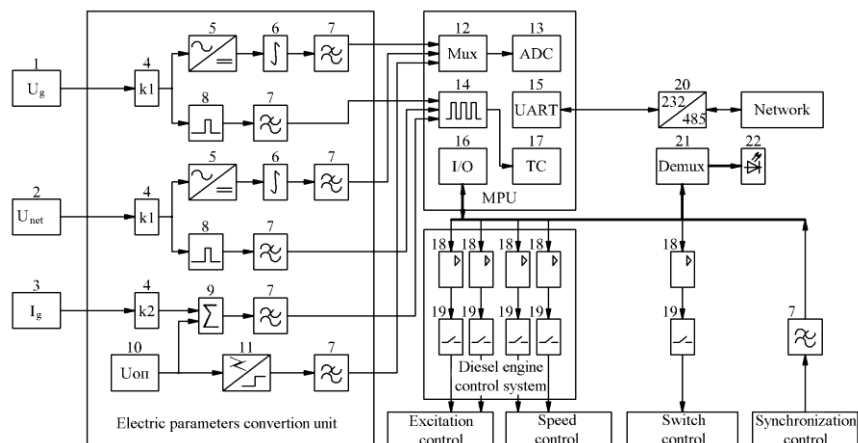
Поверхні залежностей частоти та скважності імпульсів керування від ϵ і $d\epsilon$ при індуктивному характері навантаження



Експериментальний зразок мікропроцесорної системи керування корабельним/судновим дизель-генераторним агрегатом



Функціональна структура системи запуску аварійного ДГА, синхронізації і розподілу потужності



Розроблену систему впроваджено на підприємстві ТОВ НВП “Інтер Електро” (м. Миколаїв) для використання при виробництві суднових та корабельних щитів та пультів керування





ОПИС РОЗРОБКИ

Дискретно-детерміновані моделі засобів автоматизації:

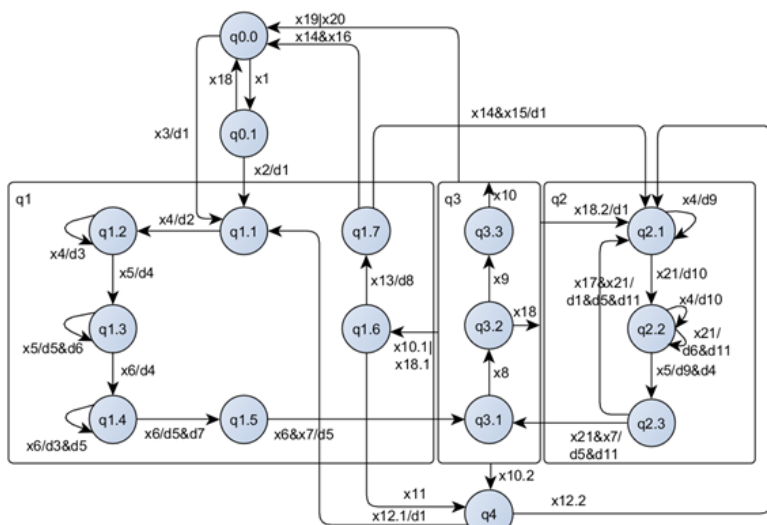
Система синхронізації генераторів :

$$M_1 = y_0 \downarrow^1 \bar{x}_1 \uparrow^2 \omega \uparrow^1 \downarrow^2 x_4 \uparrow^2 \omega \uparrow^3 \downarrow^3 \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & y_{1,4} & y_{1,7} & y_{1,10} & z_{2,3} \\ (x_5 \& x_6 \& x_7) \uparrow^5 & y_{3,5} & \omega \uparrow^1 \\ \downarrow^5 \bar{x}_5 \uparrow^4 & y_{3,6} & \omega \downarrow^4 & \bar{x}_6 \uparrow^3 & y_{3,7} & \omega \uparrow^3 \end{bmatrix}$$

Система захисту силових агрегатів:

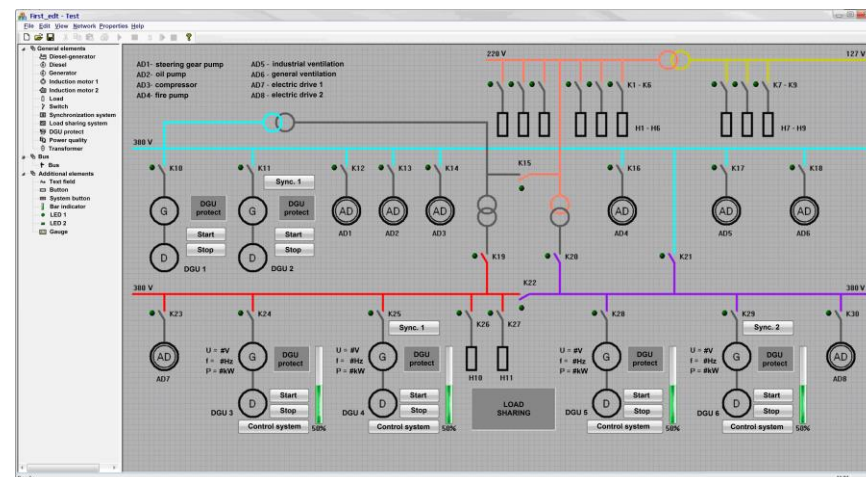
$$y_0 \downarrow^1 x_1 \uparrow^2 \omega \uparrow^1 \downarrow^2 \begin{bmatrix} y_{1,7} - y_{1,11} \\ z_{2,1} & z_{2,2} \\ (x_{2,1} | x_{2,2} | \dots | x_{2,6}) \uparrow^1 \\ (y_{3,1} | y_{3,2}) \omega \uparrow^1 \end{bmatrix} T=5c$$

Компоненти програмного забезпечення реалізовані у вигляді цифрових автоматів:

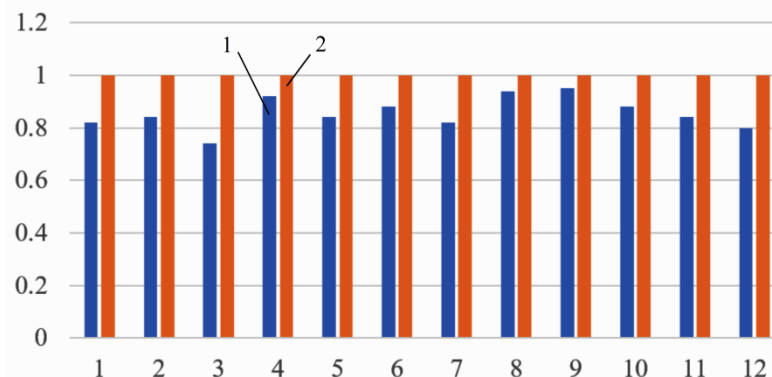


Структурно-алгоритмічна оптимізація дозволила усунути апаратну надмірність та зменшити на 15-20% собівартість розроблених засобів автоматизації.

Головне вікно розроблених програмних засобів для керування та моніторингу параметрів АЕЕС



Покриття вимог до показників практичності програмних засобів



1 – показники для поточної версії ПЗ;
2 – ідеальні показники.

Схема експериментальної системи управління резонансного перетворювача

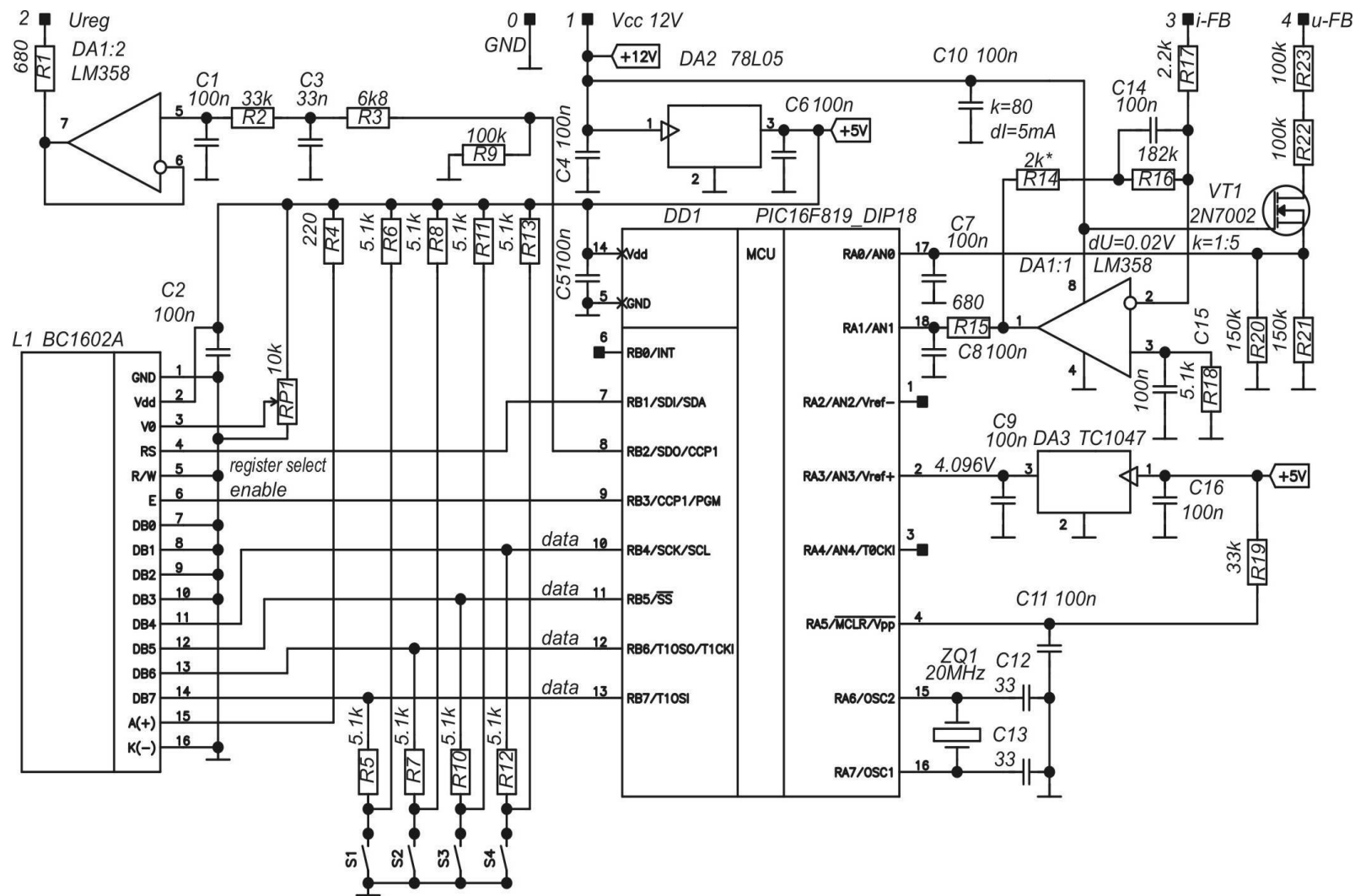
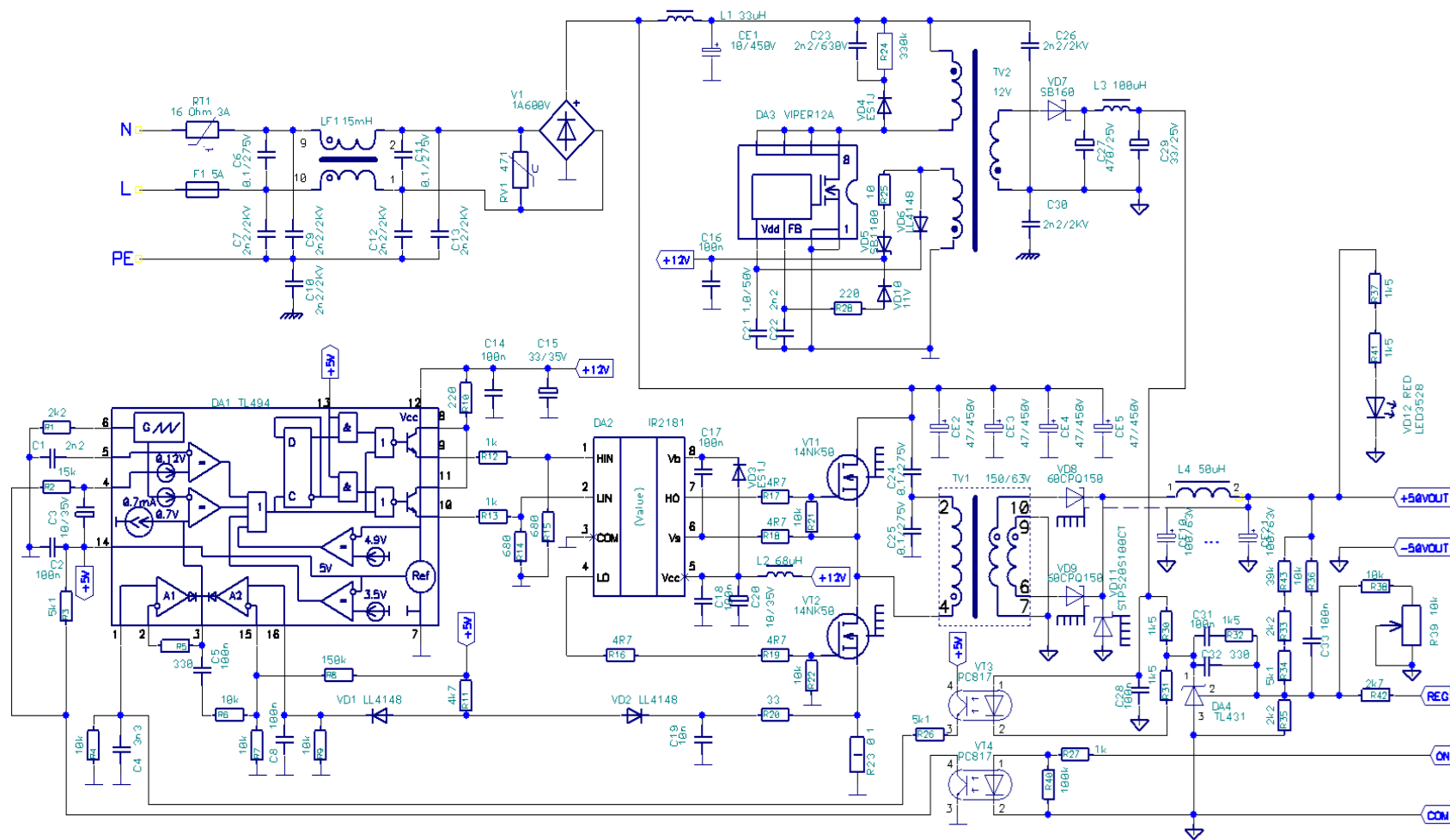
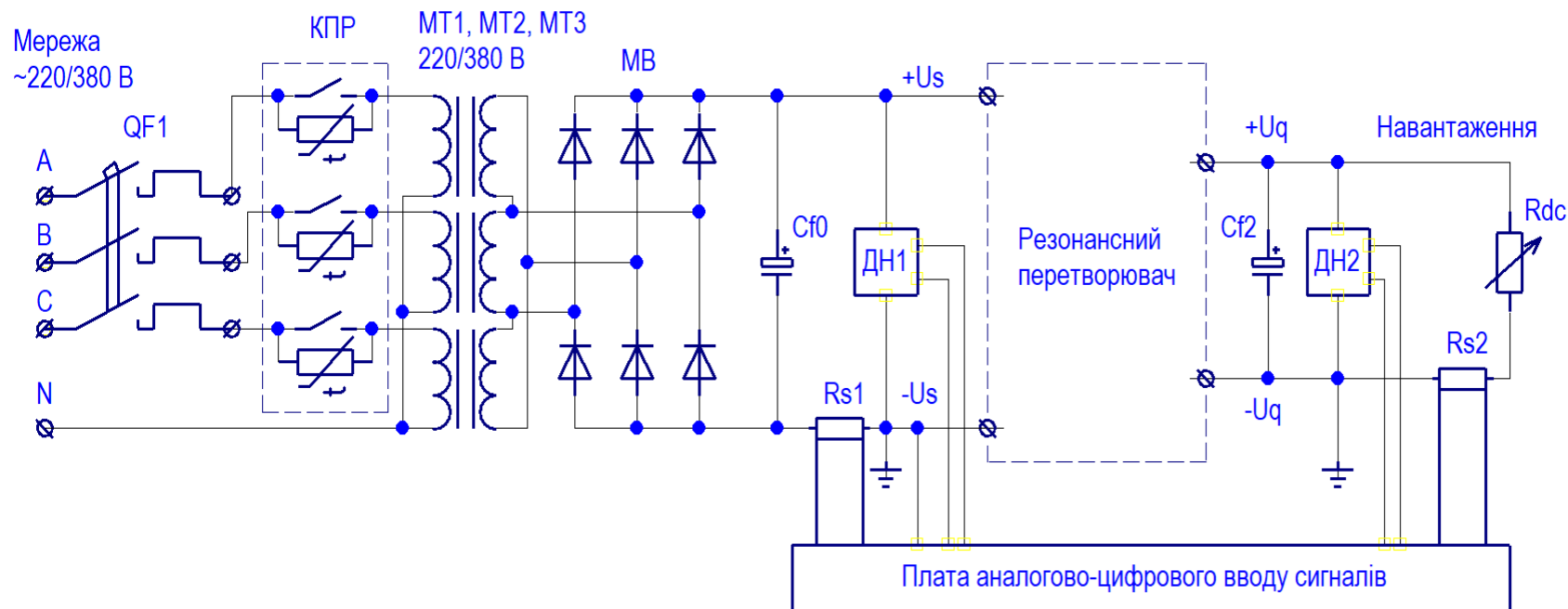


Схема експериментального резонансного перетворювача



Експериментальна схема підключення опитного РП при знятті робочих характеристик



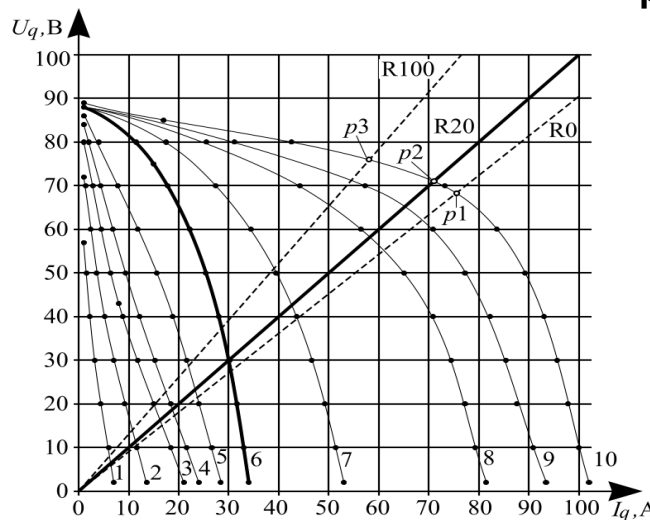
КПР – комутатор пускових резисторів; MT1, MT2, MT3 – мережеві трансформатори напруги; МВ – мережевий трифазний випрямляч; Rs1, Rs2 – датчики струмів; ДН1, ДН2 – датчики напруги

Зовнішній вигляд дослідного резонансного перетворювача для системи розмагнічування



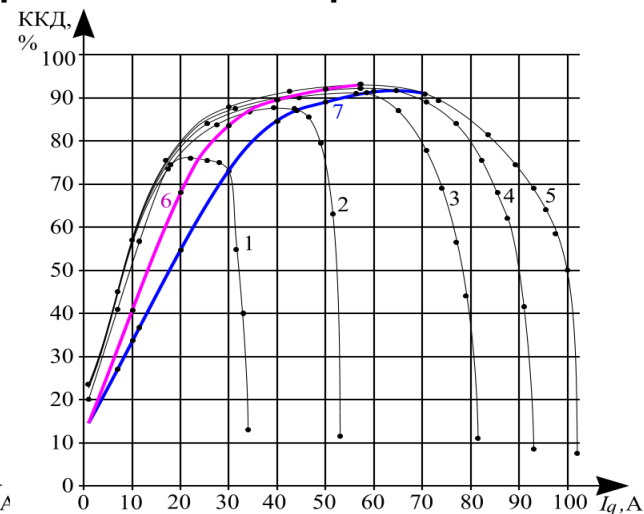
Параметри дослідного

Зовнішні характеристики резонансного перетворювача



- графіки 1-6 при робочій частоті $f_g = 2$ КГц та при значеннях ширини імпульсів інвертору $g = 20\%$; 30% ; 40% ; 50% ; 70% ; 99% відповідно;
- графіки 6-10 при ширині імпульсів інвертору $g = 99\%$ та при значеннях робочої частоти $f_g = 2$ КГц; 1.7 КГц; 1.2 КГц; 1 КГц; 0.9 КГц відповідно;
- графіки R0, R20, R100 – вольт-амперні характеристики навантаження при температурах 0°C ; 20°C ; 100°C

Характеристики ККД резонансного перетворювача при різних значеннях робочої частоти



- графіки 1-5 при $f_g = 2$ КГц; 1.7 КГц; 1.2 КГц; 1 КГц; 0.9 КГц відповідно;
- графік 6 при регулюванні $g = 0-100\%$ та $f_g = 2$ КГц і при $g = 100\%$ та $f_g = 2-0.9$ КГц на навантаженні $R_{dc, 100^\circ\text{C}} = 1.3$ Ом;
- графік 7 аналогічно 6 на навантаженні $R_{dc, 20^\circ\text{C}} = 1.0$ Ом

резонансного перетворювача для розмагнічування:

- Постійна напруга живлення 250-600 В (шина загального випрямляча);
- Номінальна потужність $P_n = 5$ кВт;
- Максимальна вихідна напруга (холостий хід) $U_s = 80$ В;
- Максимальний вихідний струм (при к. з. виходу) $I_{dc_max} = 100$ А;
- Мінімальний опір навантаження $R_{dc} \geq 1$ Ом;
- ККД при номінальній потужності біля 91%.



ОТРИМАНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ПРОДУКЦІЯ

- ❑ Розроблено мікропроцесорну систему керування корабельними/судновими дизель-генераторними агрегатами для забезпечення їх спільної паралельної роботи на загальне навантаження (або з береговою мережею), що характеризується зменшеними на 15-20% величинами коливань реактивної потужності, обумовлених нестабільністю обертів і коливаннях напруги дизель-генераторних агрегатів. Зменшення коливань реактивної потужності досягається за рахунок використання в системі керування регулятора на базі нечіткої логіки, що враховує нелінійні властивості дизель-генератора як об'єкта керування.
- ❑ Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для автоматизації процесів керування генеруванням та розподіленням електроенергії в АЕЕС, що відрізняється розвиненими засобами графічного інтерфейсу користувача; використання розробленого ПЗ дозволяє підвищити енергоефективність АЕЕС та зменшити витрати палива на 3-5% за рахунок реалізації такої стратегії керування АЕЕС, при якій ДГА працюють у режимах з найвищим ККД.
- ❑ Розроблені резонансний перетворювач з чисельно-частотним керуванням вихідних параметрів забезпечують підвищення ККД не менше ніж на 7-10% у всьому діапазоні регулювання на відміну з перетворювачами з жорсткою комутацією електронних ключів при широтно-імпульсній модуляції.

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

- ❑ Наукові результати НДР використані при виконанні господарчих договорів, що виконувалися авторами проєкту. Також розроблену систему та програмне забезпечення прийнято до використання на підприємстві м. Миколаєва ТОВ НВП «Інтер Електро» (акти впровадження від 29.10.2024 р. та від 18.11.2025 р.) та планується використовувати при виробництві суднових/корабельних та загальнопромислових щитів керування та розподілення електроенергії. Резонансний перетворювач постійної напруги з чисельно-частотним керуванням в ТОВ “Осциллон” планується використовувати при виробництві резонансних перетворювачів електроенергії. Результати роботи впроваджено в навчальний процес кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій НУК ім. адм. Макарова в курсах «Об'єктно-орієнтоване програмування вбудованих мікропроцесорних систем» та «Суднові електронні системи та комплекси» (акт впровадження від 16.12.2025 р.), також в навчальний процес кафедри комп'ютеризованих систем управління НУК ім. адм. Макарова в курсі “Електроніка і мікросхемотехніка” (акт впровадження від 16.12.2025 р.).



Результативність виконання науково-дослідної роботи

Показники	Заплановано (відповідно до запиту)	Виконано (за результ. НДР)	% виконання
	кількість	кількість	%
Публікації виконавців за тематикою НДР:			
1.1. Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних.	6	7	>100%
1.2. Публікації в матеріалах конференцій, що входять до наукометричних баз даних.	1	3	>100%
1.3. Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань України.	4	5	>100%
1.4. Публікації у матеріалах конференцій та виданнях, що не включені до переліку наукових фахових видань України.	2	15	>100%
1.5. Монографії, розділи монографій (в т.ч. у виданні країн ЄС).	1	1	100%
1.6. Підручники.	-	-	-
1.7. Навчальні посібники.	2	2	100%
1.8. Словники, довідники.	-	-	-
Підготовка наукових кадрів:			
2.1. Захищено докторських дисертацій за тематикою НДР.	1	2	>100%
2.2. Подано до розгляду спеціалізовану вчену раду докторських дисертацій за тематикою НДР.	-	-	-
2.3. Захищено кандидатських дисертацій за тематикою НДР.	1	1	100%
2.4. Подано до розгляду у спеціалізовану вчену раду кандидатських дисертацій за тематикою НДР.	-	-	-
2.5. Захищено магістерських робіт за тематикою НДР.	6	6	100%
Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності, створені за тематикою НДР:			
3.1. Отримано патентів України.	3	3	100%
3.2. Подано заявок на отримання патенту України.	0	5	>100%
3.3. Отримано патентів інших держав.	-	-	-
3.4. Подано заявок на отримання патенту інших держав.	-	-	-
Впровадження результатів			
4.1. Господарчі договори	1/1,200 тис. грн	2/1250	>100%
4.2. Довідки про планування використання результатів від підприємств	1	3	>100%
4.3. Впровадження в початковий процес (акти про впровадження)	1	2	>100%