

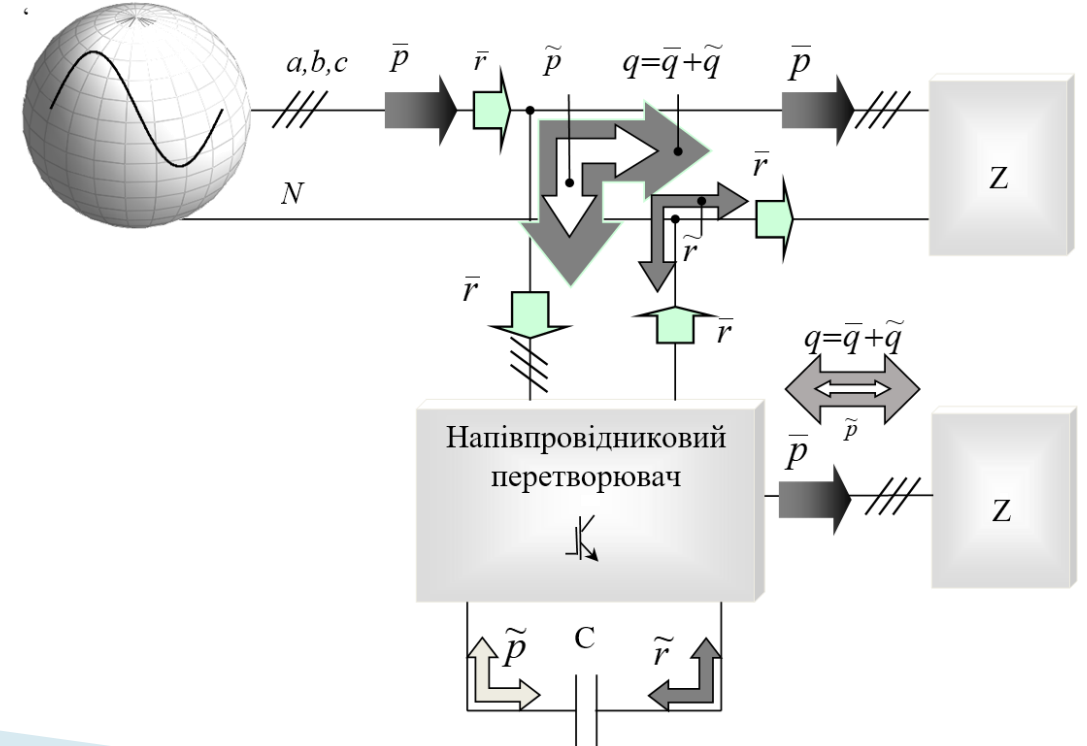
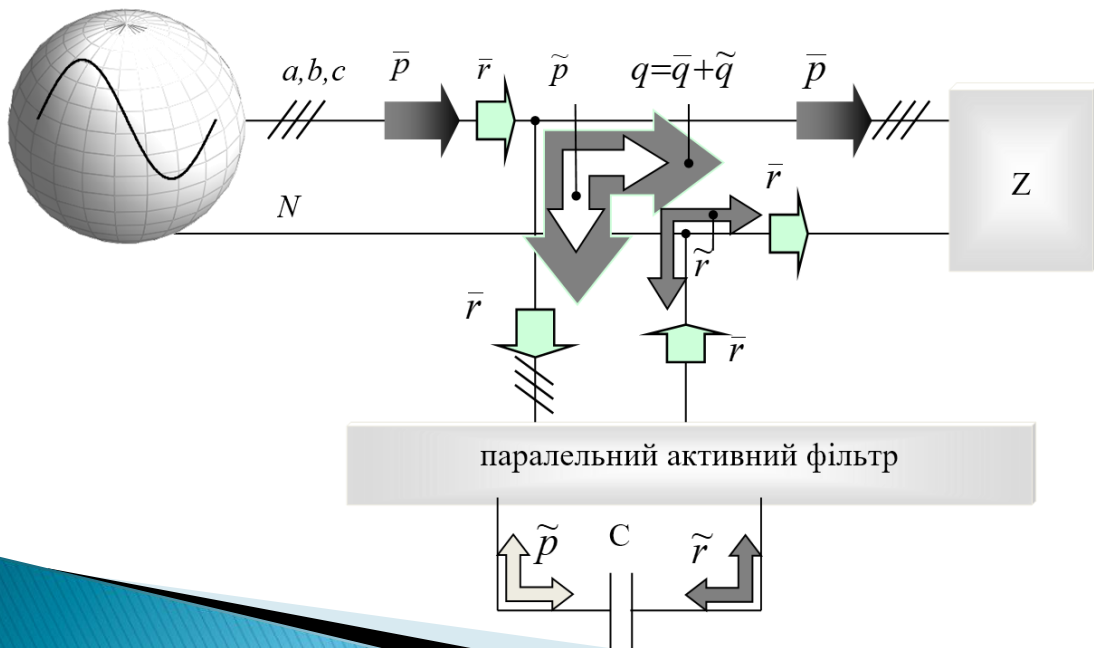
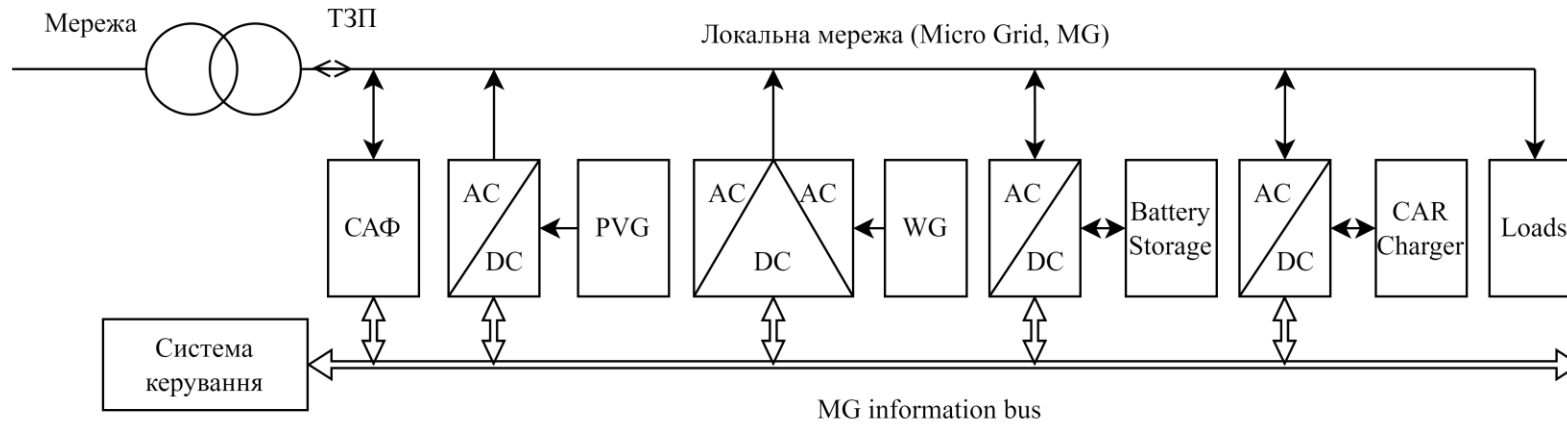
Активна фільтрація внутрішніми засобами напівпровідникових перетворювачів для електромагнітної сумісності з мережею живлення

Чопик В. В.

Старший науковий співробітник
відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів



Активна фільтрація внутрішніми засобами напівпровідникових перетворювачів для електромагнітної сумісності з мережею живлення



Стратегії поліпшення електромагнітної сумісності з мережею та загального підвищення енергоефективності.

- **Стратегія координованого керування:** використовується для компенсації навантаження та статичного коригування коефіцієнта потужності в промислових мережах.
- **Енергозберігаюча стратегія:** використовується для зниження енергоспоживання електрообладнання, що працює з частковим навантаженням. (Розподілене споживання/генерація)
- **Стратегія регулювання напруги:** використовується для підтримки стабільності напруги в мережі та уникнення перенапруги при зміні умов навантаження. (Послідовні активні фільтри)
- **Стратегія фільтрації гармонік:** використовується для фільтрації гармонічних складових, які можуть викликати перешкоди в роботі електричного обладнання. (Пасивна фільтрація)
- **Стратегія запобігання електромагнітним перешкодам:** використовується для запобігання електромагнітним перешкодам від інших навантажень, що працюють у тій же мережі. (Електромагнітна сумісність на високих частотах)
- **Стратегія активної фільтрації:** використовується поліпшення якості електроенергії у вузлах загального підключення потужних споживачів також в умовах несиметрії напруг живлення, несиметрії та нелінійності навантаження.

Ідентифікація потужності несиметрії в трифазній трипровідній мережі

Розкладання струму навантаження

$$\dot{i}_+ = I_{R+} + jI_{I+}; \quad \dot{i}_+ = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{e}}_- = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}^* / U = (\bar{\mathbf{u}} \wedge \bar{\mathbf{i}}^*)^* / U = (P - jQ) / U;$$

$$\dot{i}_- = I_{R-} + jI_{I-}; \quad \dot{i}_- = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{e}}_+ = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_-^* / U = (D_R - jD_I) / U.$$

$$\mathbf{i}(t) = \frac{P\mathbf{u}_P(t) + Q\mathbf{u}_Q(t) + D_R\mathbf{u}_{DR}(t) + D_I\mathbf{u}_{DI}(t)}{U^2} =$$

$$= \frac{P}{3U^2} \begin{Bmatrix} u_{AB} - u_{CA} \\ u_{BC} - u_{AB} \\ u_{CA} - u_{BC} \end{Bmatrix} + \frac{Q}{\sqrt{3}U^2} \begin{Bmatrix} u_{BC} \\ u_{CA} \\ u_{AB} \end{Bmatrix} + \frac{D_R}{3U^2} \begin{Bmatrix} u_{AB} - u_{CA} \\ u_{CA} - u_{BC} \\ u_{BC} - u_{AB} \end{Bmatrix} + \frac{D_I}{\sqrt{3}U^2} \begin{Bmatrix} u_{BC} \\ u_{AB} \\ u_{CA} \end{Bmatrix}.$$

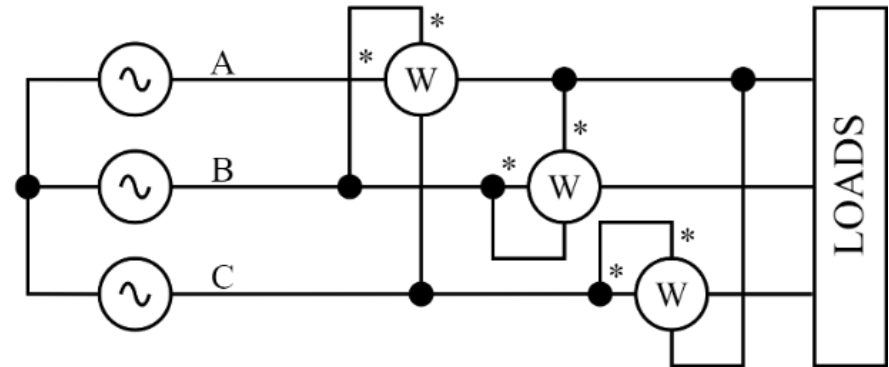
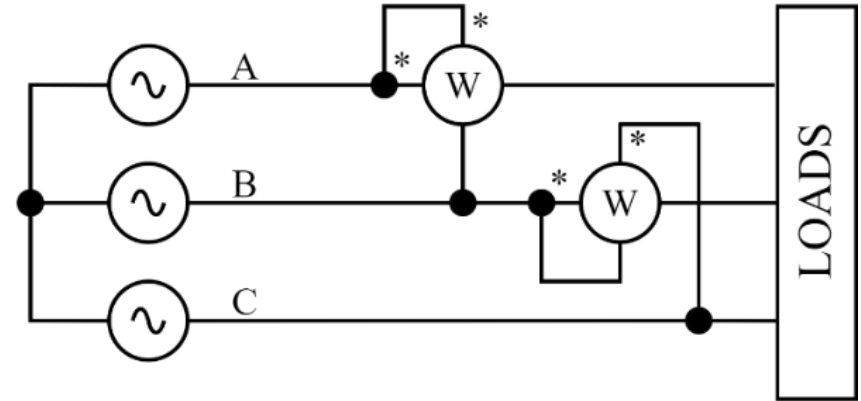
$$P = \text{Re}(\bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_P^*) = \text{Re}(\dot{i}_A \dot{U}_A^* + \dot{i}_B \dot{U}_B^* + \dot{i}_C \dot{U}_C^*) = \text{Re}(\dot{i}_A \dot{U}_{AC}^* + \dot{i}_B \dot{U}_{BC}^*) = \int_T (u_{AC} i_A + u_{BC} i_B) dt$$

$$Q = \text{Re}(\bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_Q^*) = \int_T (u_{BC} i_A + u_{CA} i_B + u_{AB} i_C) dt / \sqrt{3}$$

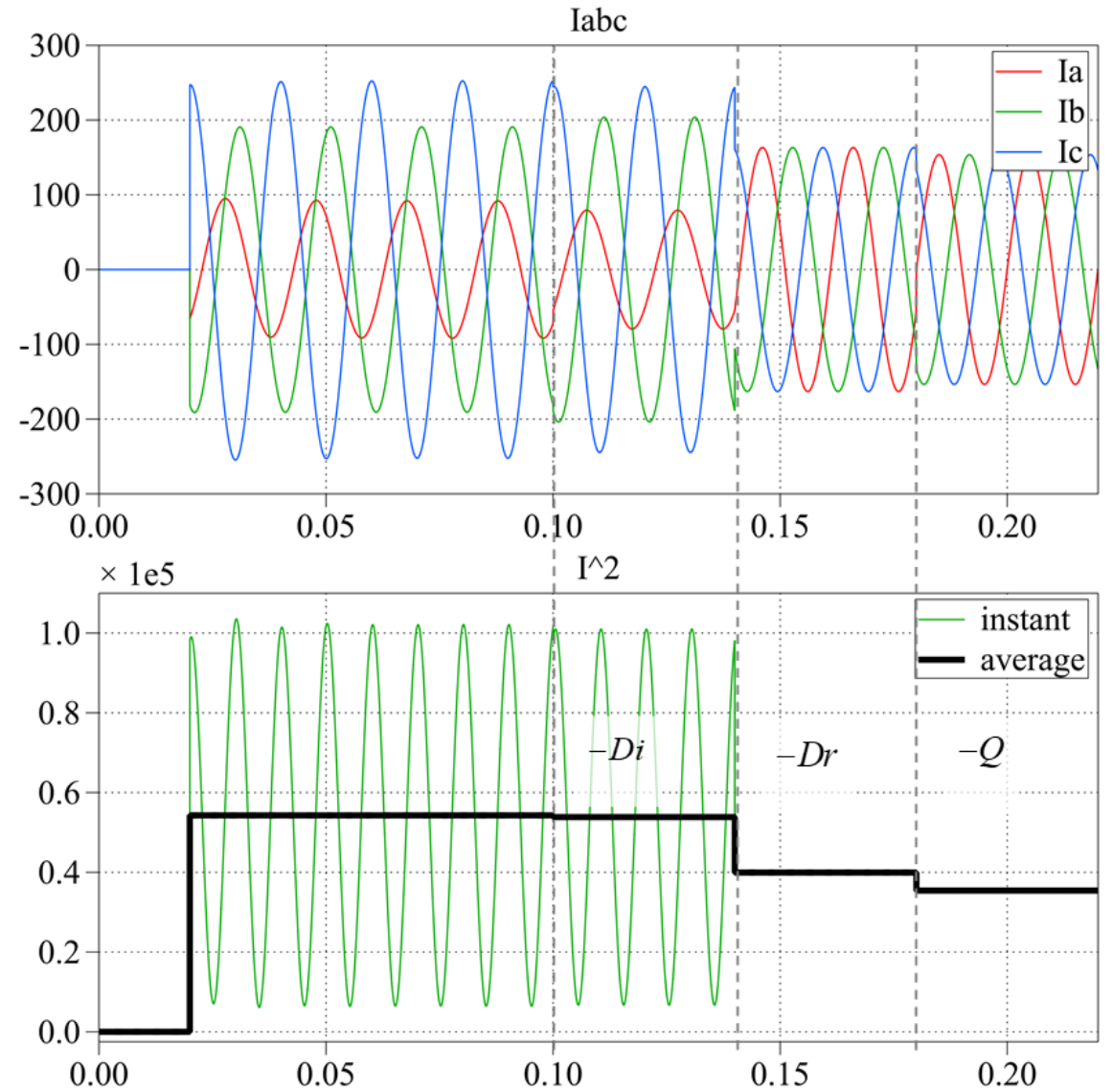
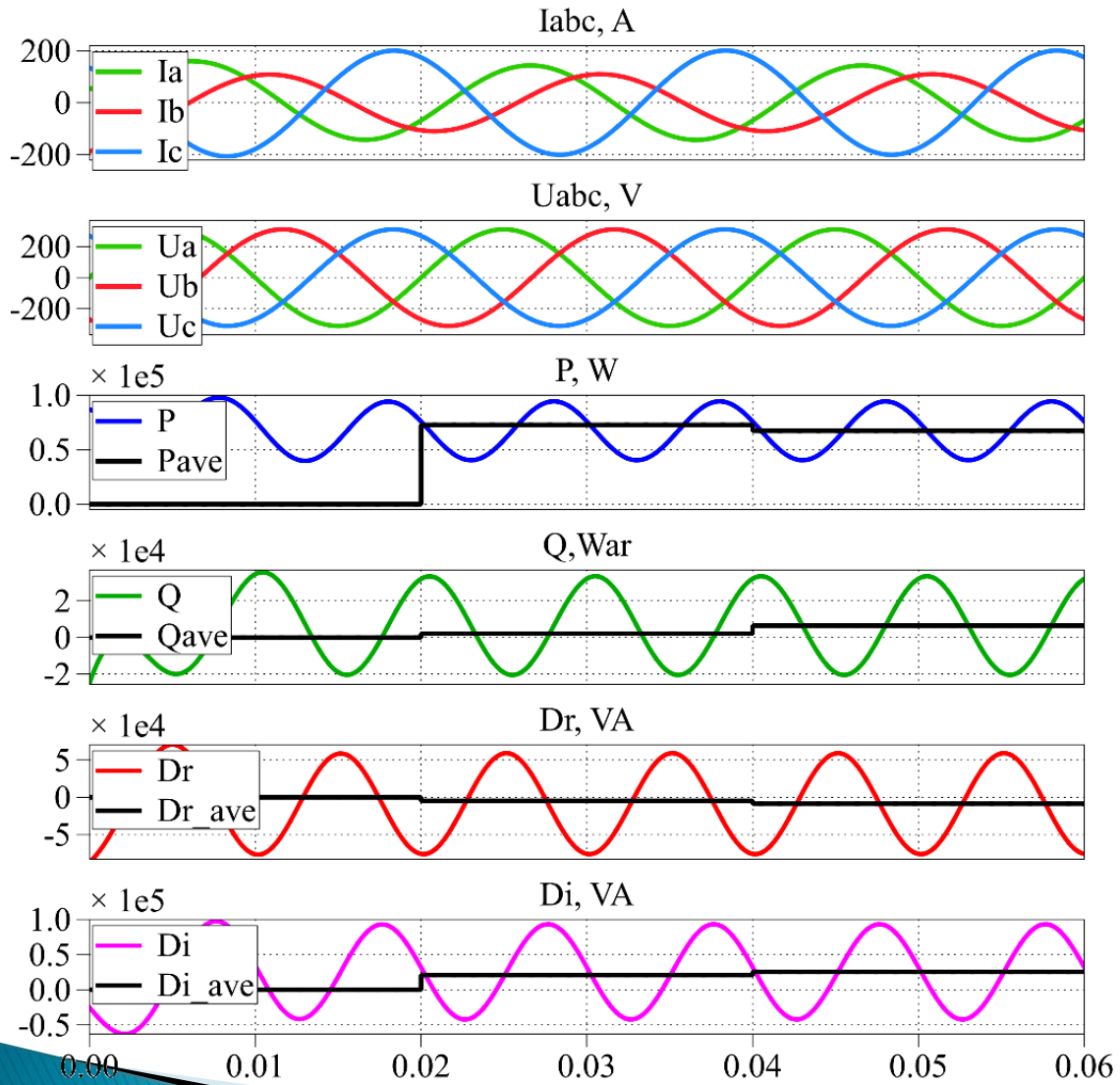
$$D_R = \text{Re}(\bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_{DR}^*) = \int_T (u_A i_A + u_C i_B + u_B i_C) dt = \int_T (u_{AB} i_A + u_{CB} i_B) dt = W_{AB,A} + W_{CB,B};$$

$$D_I = \text{Re}(\bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_{DI}^*) = \int_T (u_{BC} i_A + u_{AB} i_B + u_{CA} i_C) dt / \sqrt{3} = (W_{BC,A} + W_{AB,B} + W_{CA,C}) / \sqrt{3},$$

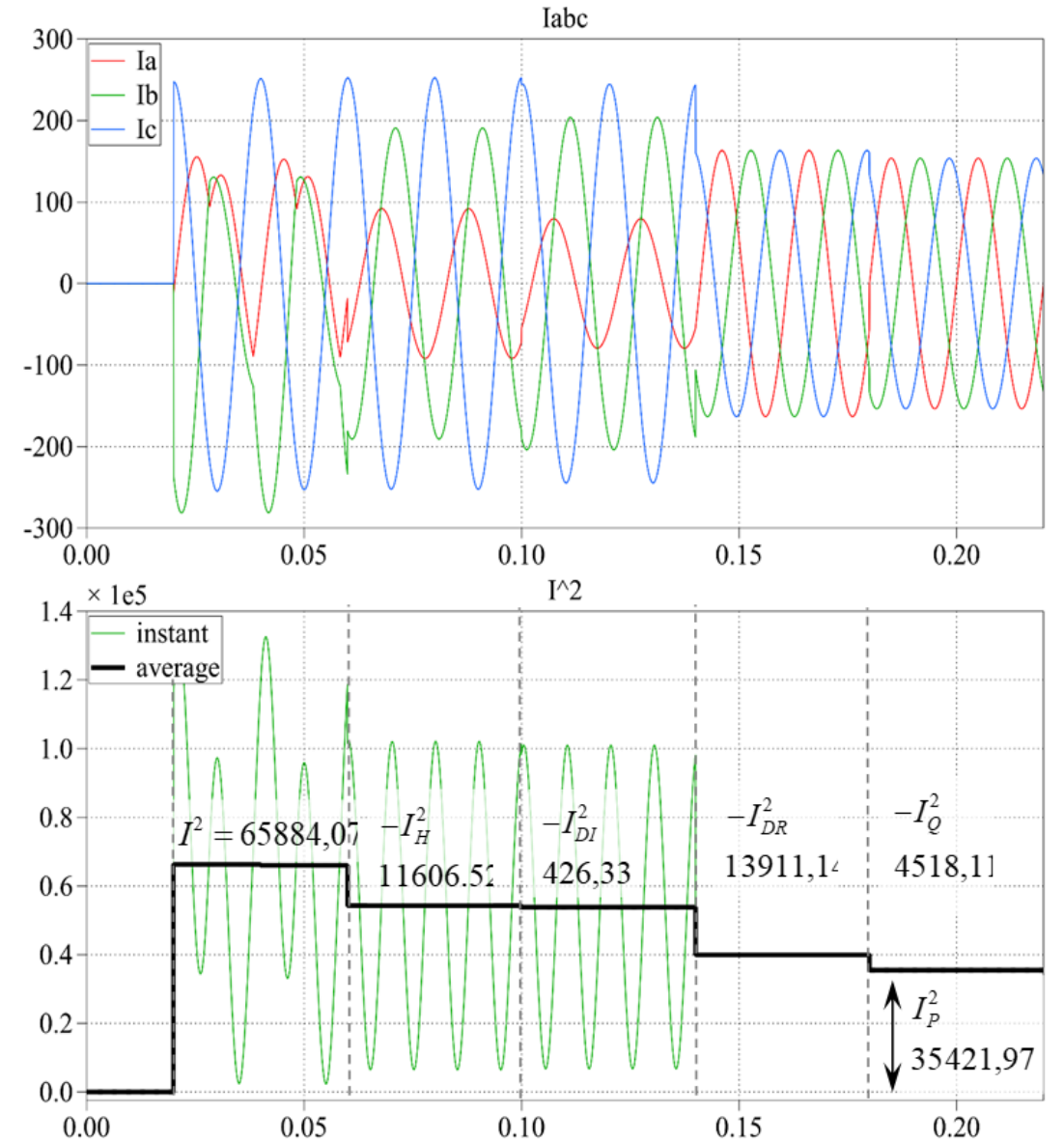
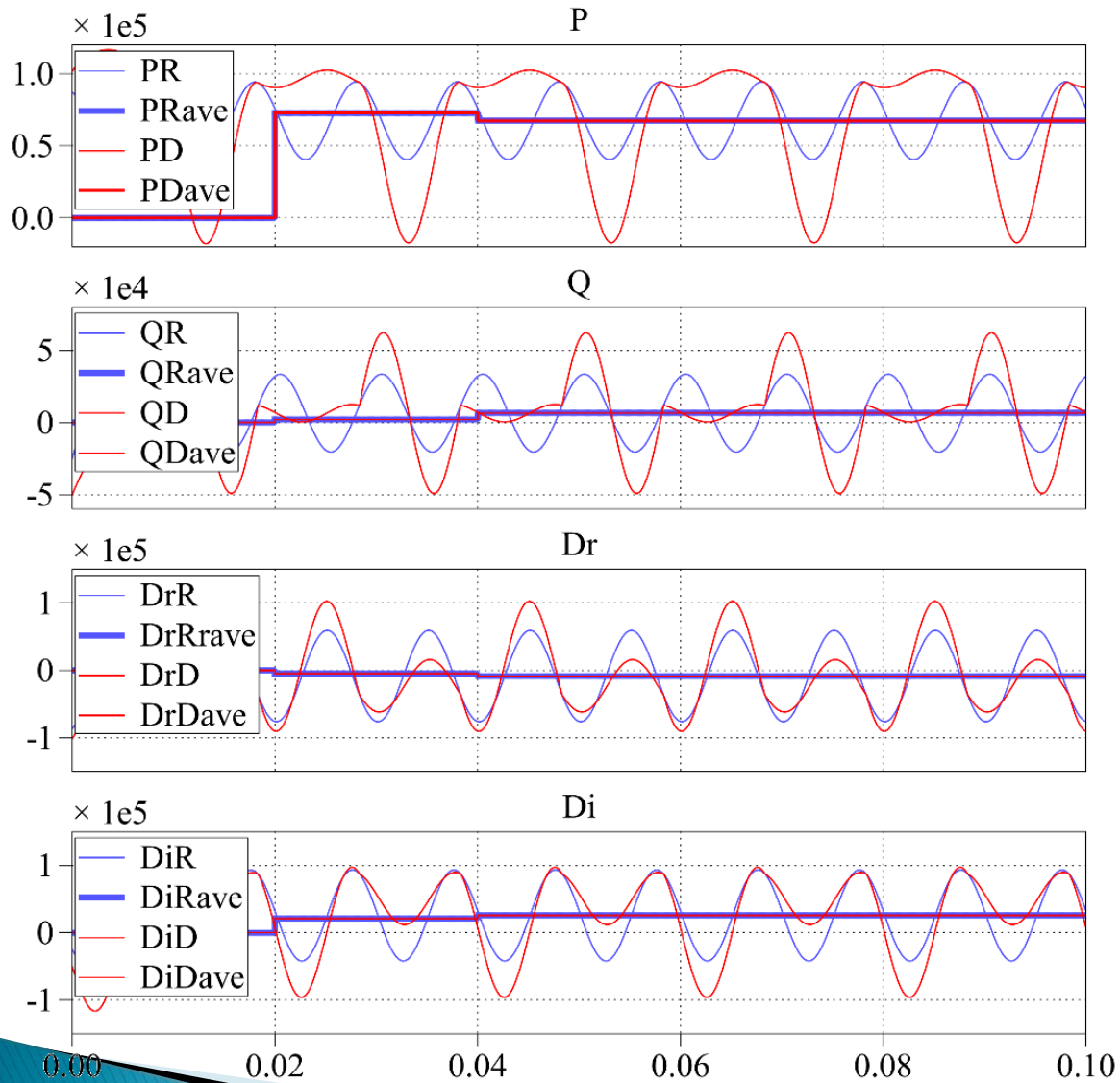
$$S^2 = P^2 + Q^2 + D_R^2 + D_I^2 + H^2 \quad H^2 = U^2 I_H^2$$



Моделювання процесів компенсації в трифазній трипровідній мережі з лінійним навантаженням



Моделювання процесів компенсації в трифазній трипровідній мережі з нелінійним навантаженням

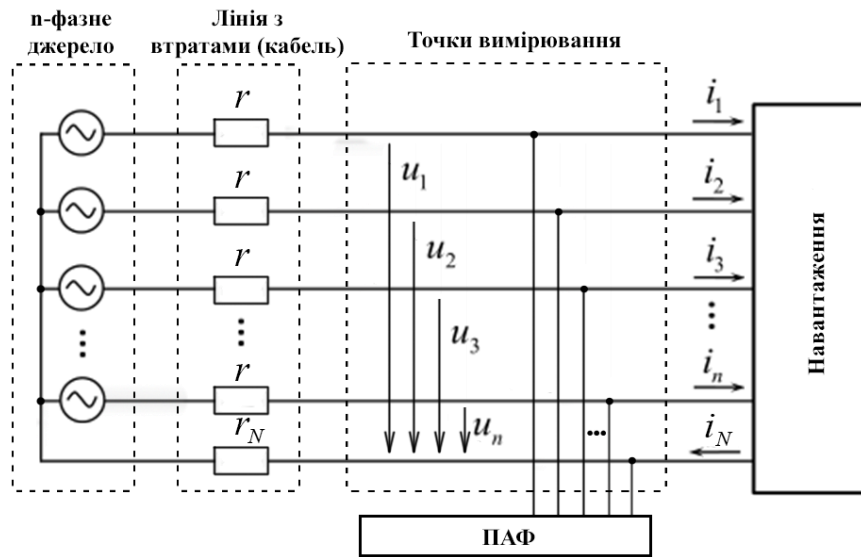


Ідентифікація потужності несиметрії в трифазній чотирипровідній мережі

Моделювання процесів компенсації в трифазній чотирипровідній мережі з нелінійним навантаженням

$$S^2 = \Delta P P_0 = P^2 + Q^2 + D_R^2 + D_I^2 + (N_R^2 + N_I^2)(1 + 3\rho) + H^2$$

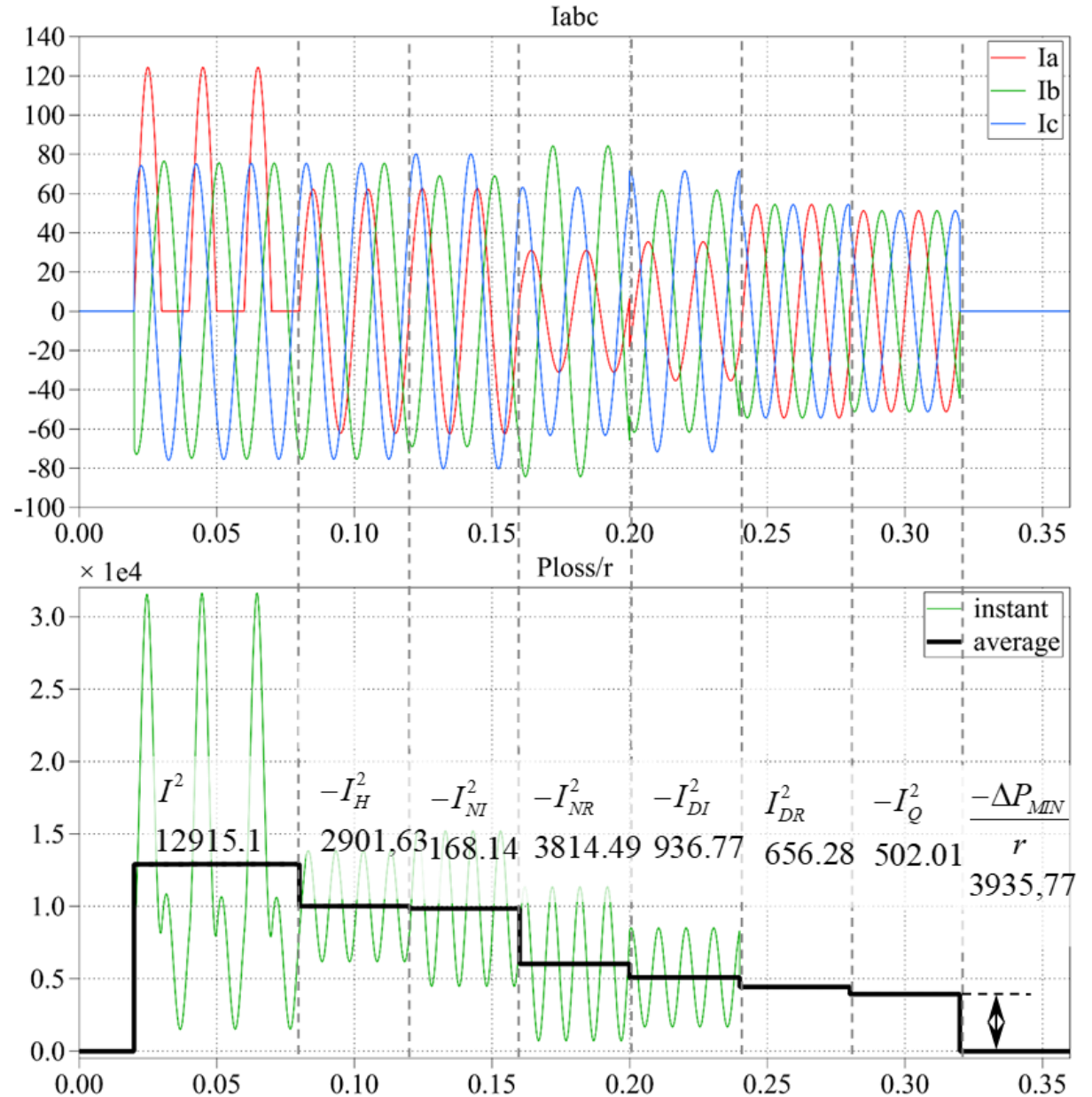
$$\rho = r_N / r$$



$$P - jQ = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_+^* = U \begin{vmatrix} \bar{Y}_A \\ \tilde{a}\bar{Y}_B \\ \dot{a}\bar{Y}_C \end{vmatrix} \wedge U \begin{vmatrix} 1 \\ \tilde{a} \\ \dot{a} \end{vmatrix}^* = U^2 (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C);$$

$$D_R - jD_I = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_-^* = U \begin{vmatrix} \bar{Y}_A \\ \tilde{a}\bar{Y}_B \\ \dot{a}\bar{Y}_C \end{vmatrix} \wedge U \begin{vmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \tilde{a} \end{vmatrix}^* = U^2 (\bar{Y}_A + \dot{a}\bar{Y}_B + \tilde{a}\bar{Y}_C);$$

$$N_R - jN_I = \bar{\mathbf{i}} \wedge \bar{\mathbf{u}}_0^* = U \begin{vmatrix} \bar{Y}_A \\ \tilde{a}\bar{Y}_B \\ \dot{a}\bar{Y}_C \end{vmatrix} \wedge U \begin{vmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix}^* = U^2 (\bar{Y}_A + \tilde{a}\bar{Y}_B + \dot{a}\bar{Y}_C),$$



Вимірювання неактивних потужностей у трифазній системі електропостачання

Оптимізація обчислень складових потужності шляхом перетворення координат

$$\mathbf{u}(t) = \begin{pmatrix} u_A(t) \\ u_B(t) \\ u_C(t) \end{pmatrix} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} U_{ph} \cos(\omega t) \\ U_{ph} \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ U_{ph} \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{i}(t) = \begin{pmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{pmatrix} = \sqrt{2} \begin{pmatrix} I_A \cos(\omega t + \psi_A) \\ I_B \cos(\omega t + \psi_B) \\ I_C \cos(\omega t + \psi_C) \end{pmatrix} + \mathbf{i}_H(t),$$

$$\mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix}$$

$$P = U_{\text{Л}} \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{e}_P^*) = \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{u}_P^*) = \operatorname{Re}(\dot{I}_\alpha \dot{U}_\alpha^* + \dot{I}_\beta \dot{U}_\beta^*) = T^{-1} \int_T (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta) dt = W_{\alpha\alpha} + W_{\beta\beta};$$

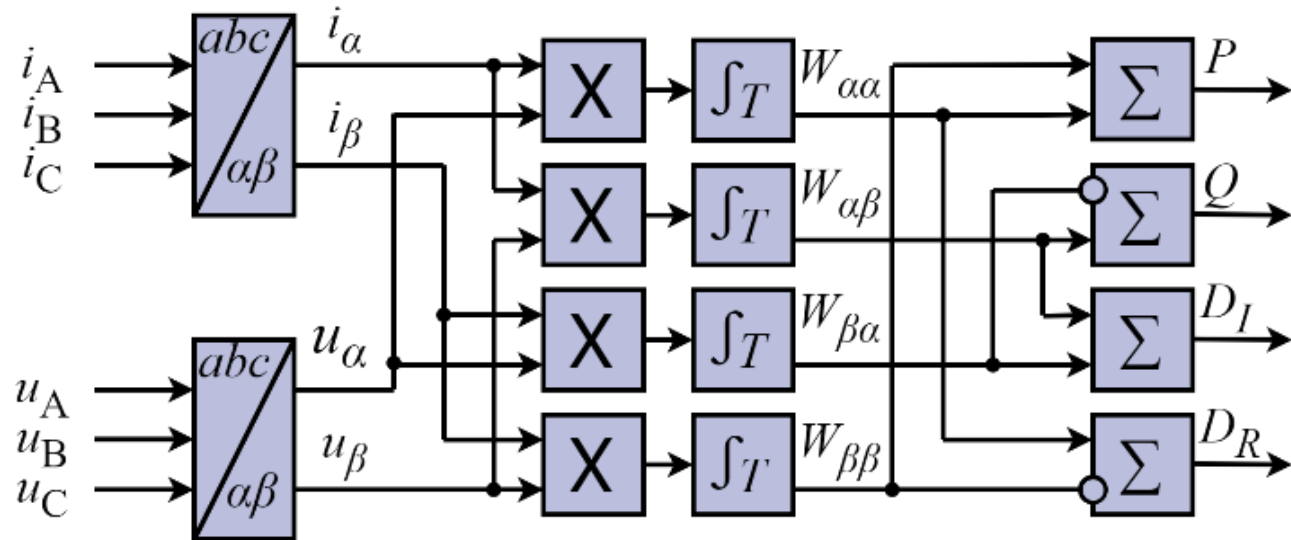
$$Q = U_{\text{Л}} \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{e}_Q^*) = \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{u}_Q^*) = \operatorname{Re}(\dot{I}_\alpha \dot{U}_\beta^* - \dot{I}_\beta \dot{U}_\alpha^*) = T^{-1} \int_T (i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha) dt = W_{\alpha\beta} - W_{\beta\alpha};$$

$$D_R = U_{\text{Л}} \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{e}_{DR}^*) = \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{u}_{DR}^*) = \operatorname{Re}(\dot{I}_\alpha \dot{U}_\alpha^* - \dot{I}_\beta \dot{U}_\beta^*) = T^{-1} \int_T (i_\alpha u_\alpha - i_\beta u_\beta) dt = W_{\alpha\alpha} - W_{\beta\beta};$$

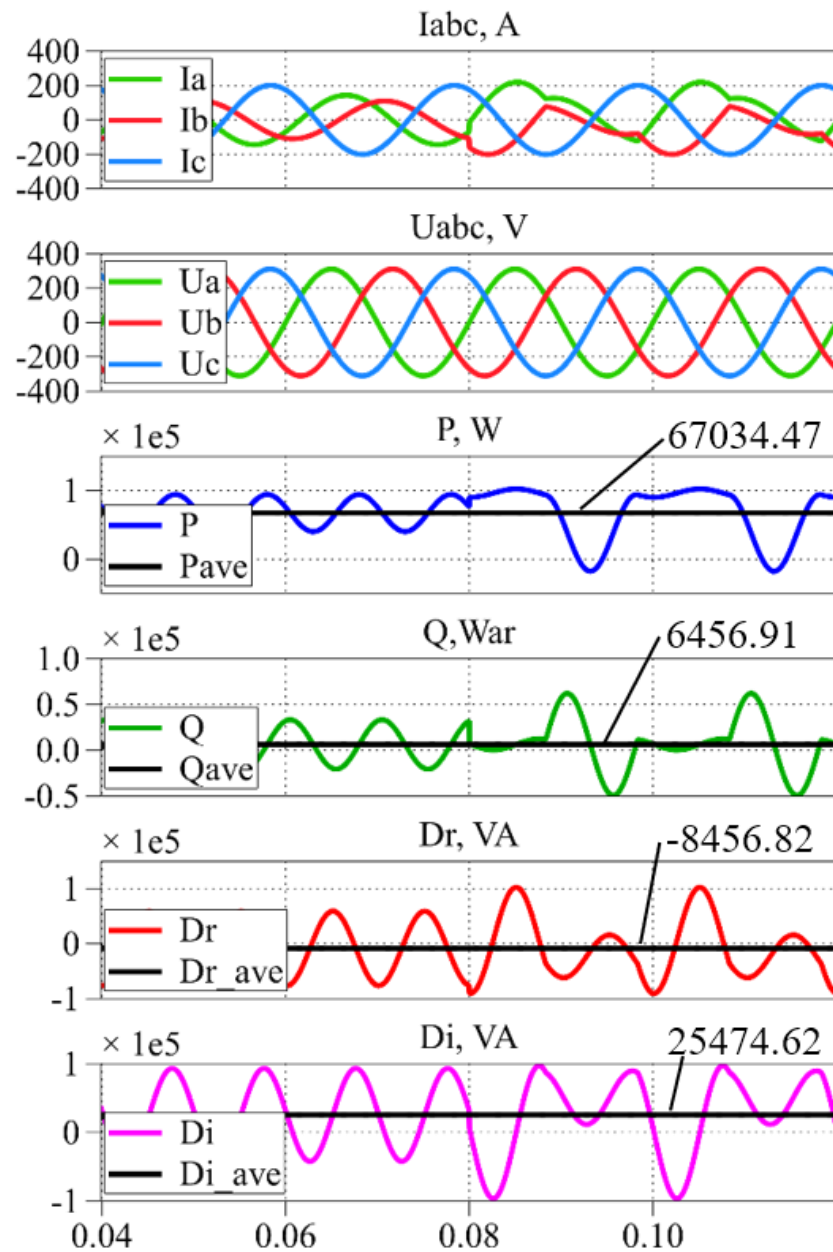
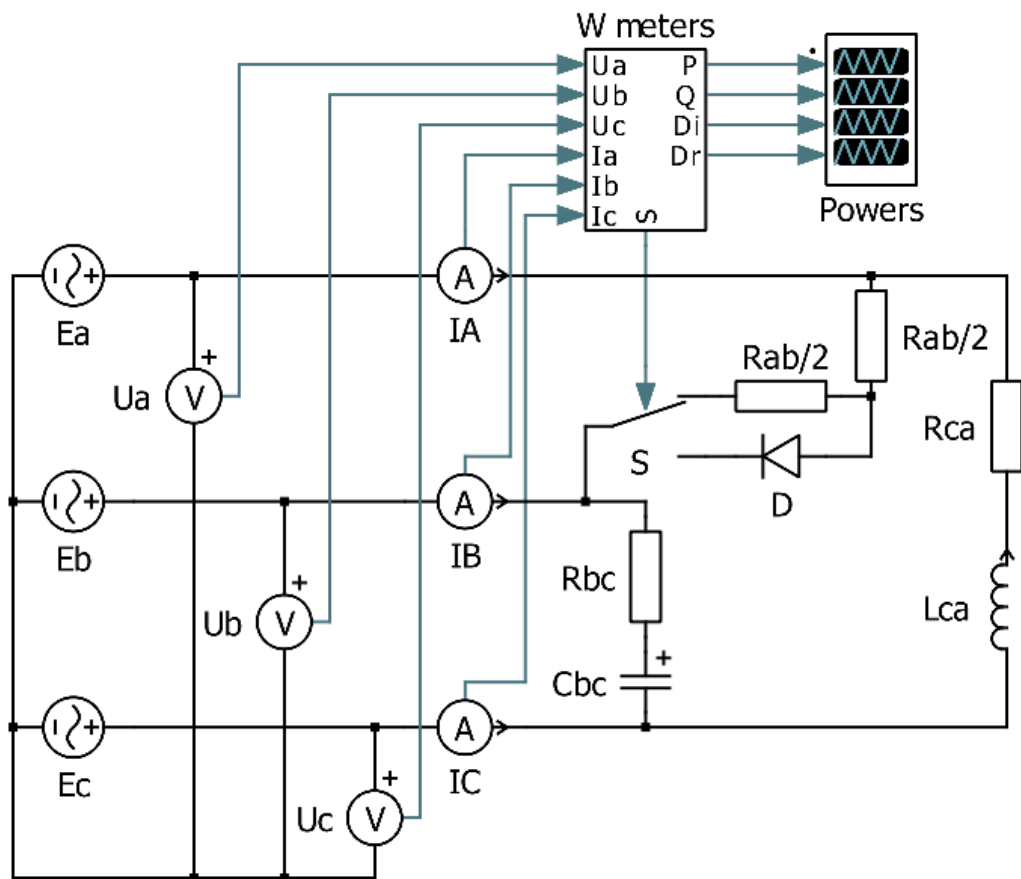
$$D_I = U_{\text{Л}} \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{e}_{DI}^*) = \operatorname{Re}(\hat{\mathbf{i}}_{\alpha\beta} \mathbf{u}_{DI}^*) = \operatorname{Re}(\dot{I}_\alpha \dot{U}_\beta^* + \dot{I}_\beta \dot{U}_\alpha^*) = T^{-1} \int_T (i_\alpha u_\beta + i_\beta u_\alpha) dt = W_{\alpha\beta} + W_{\beta\alpha},$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D_R^2 + D_I^2 = (W_{\alpha\alpha} + W_{\beta\beta})^2 + (W_{\alpha\beta} - W_{\beta\alpha})^2 + (W_{\alpha\alpha} - W_{\beta\beta})^2 + (W_{\alpha\beta} + W_{\beta\alpha})^2 = 2(W_{\alpha\alpha}^2 + W_{\beta\beta}^2 + W_{\alpha\beta}^2 + W_{\beta\alpha}^2).$$

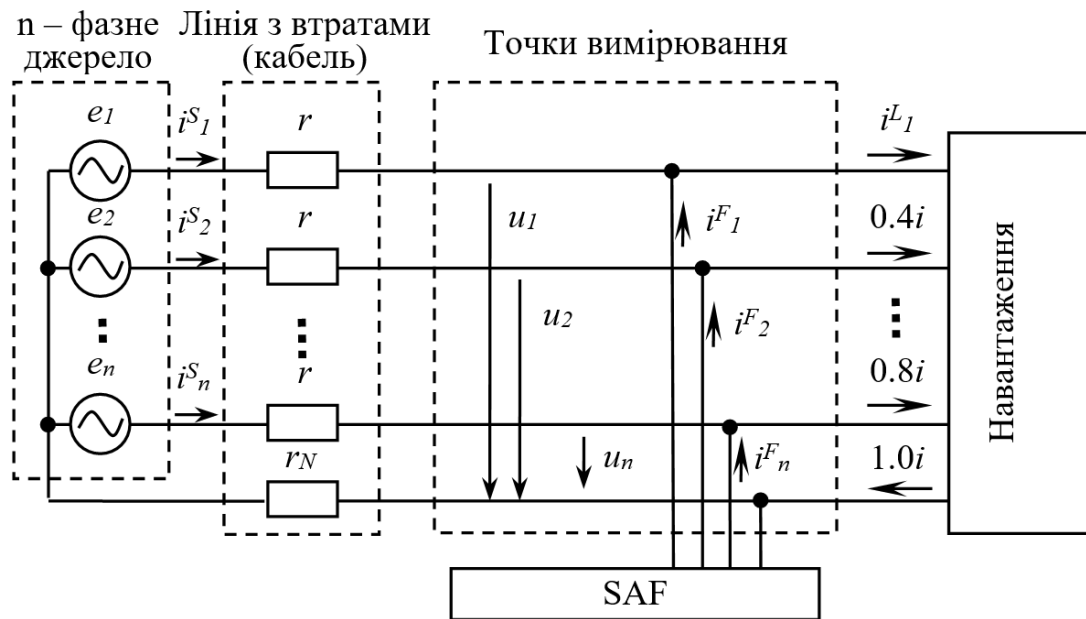
Побудова віртуальних ватметрів в $\alpha\beta$ координатах



Експериментальна верифікація запропонованих підходів



Енергозберігаючі можливості стратегії активної фільтрації з одиничним коефіцієнтом потужності



$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{e}(t) - \mathbf{R}\mathbf{i}_s(t);$$

$$\mathbf{i}_s(t) + \mathbf{i}_f(t) = \mathbf{i}_L(t);$$

$$T^{-1} \int_T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{i}_s(t) dt = T^{-1} \int_T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{i}_L(t) dt = P,$$

Задачею активної фільтрації в даному застосуванні ПАФ є мінімізація потужності втрат в лінії передачі

$$\Delta P = T^{-1} \int_T \mathbf{i}_s^\wedge(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_s(t) dt \rightarrow \min$$

Одиничне значення коефіцієнта потужності трифазної чотирипровідної системи живлення забезпечує активний струм

$$\mathbf{i}_A(t) = \frac{T^{-1} \int_T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{i}_L(t) dt}{T^{-1} \int_T \mathbf{u}^\wedge(t) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) dt} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t) = \frac{P}{P_U} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{u}(t),$$

ККД системи живлення з довільним навантаженням та активною фільтрацією з забезпеченням симетричних синусоїдних струмів джерела

Формування струму на частоті основної гармоніки складовою вектора фазних напруг прямої послідовності чергування фаз забезпечує симетричні синусоїдні струми джерела

$$\mathbf{i}_+(t) = \frac{P}{\frac{1}{T} \int_0^T [\mathbf{u}_+(t)]^{\wedge} \mathbf{u}_+(t) dt} \mathbf{u}_+(t) = \frac{P}{U_+^2} \mathbf{u}_+(t).$$

Такий вектор струмів багатофазного джерела зумовлює потужність втрат

$$\Delta P_+ = \frac{1}{T} \int_T \mathbf{i}_+^{\wedge}(t) \mathbf{R} \mathbf{i}_+(t) dt = \frac{P^2}{U_+^4 T} \int_T \mathbf{u}_+^{\wedge}(t) (r \mathbf{I} + r_N \mathbf{J} \mathbf{J}^{\wedge}) \mathbf{u}_+(t) dt = \frac{P^2 r}{U_+^2}$$

Довільне навантаження може бути охарактеризоване коефіцієнтом потужності

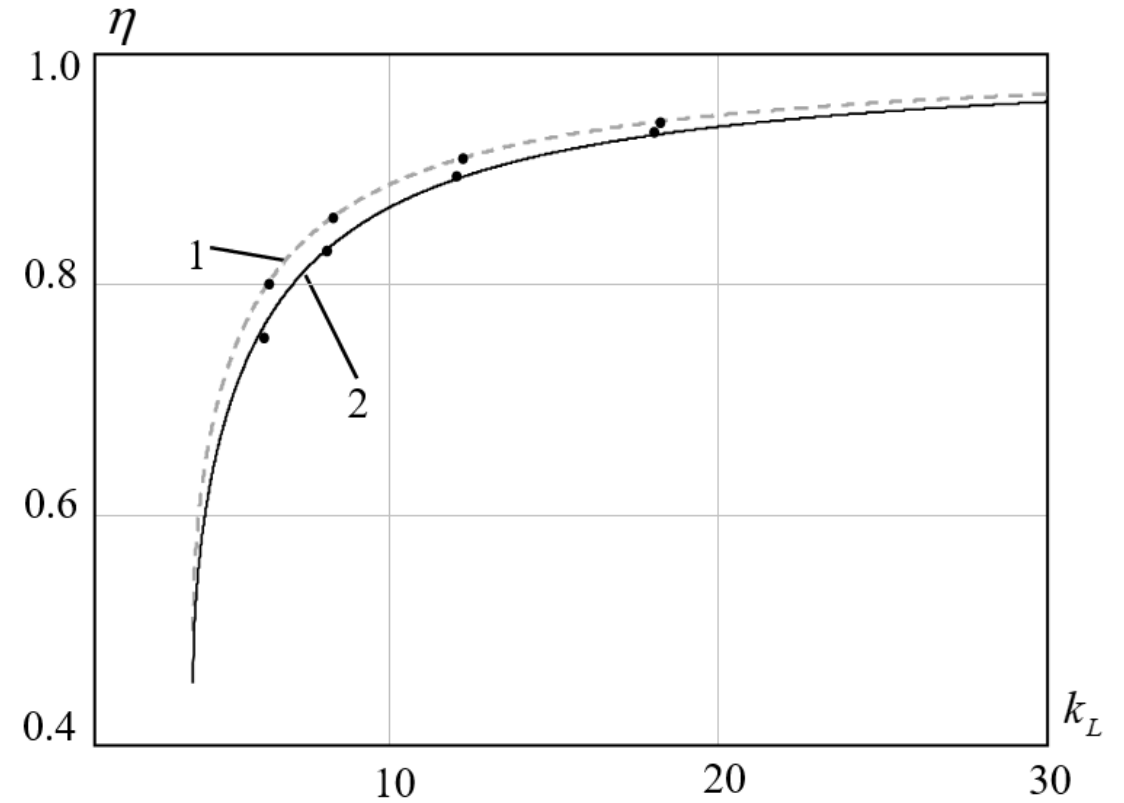
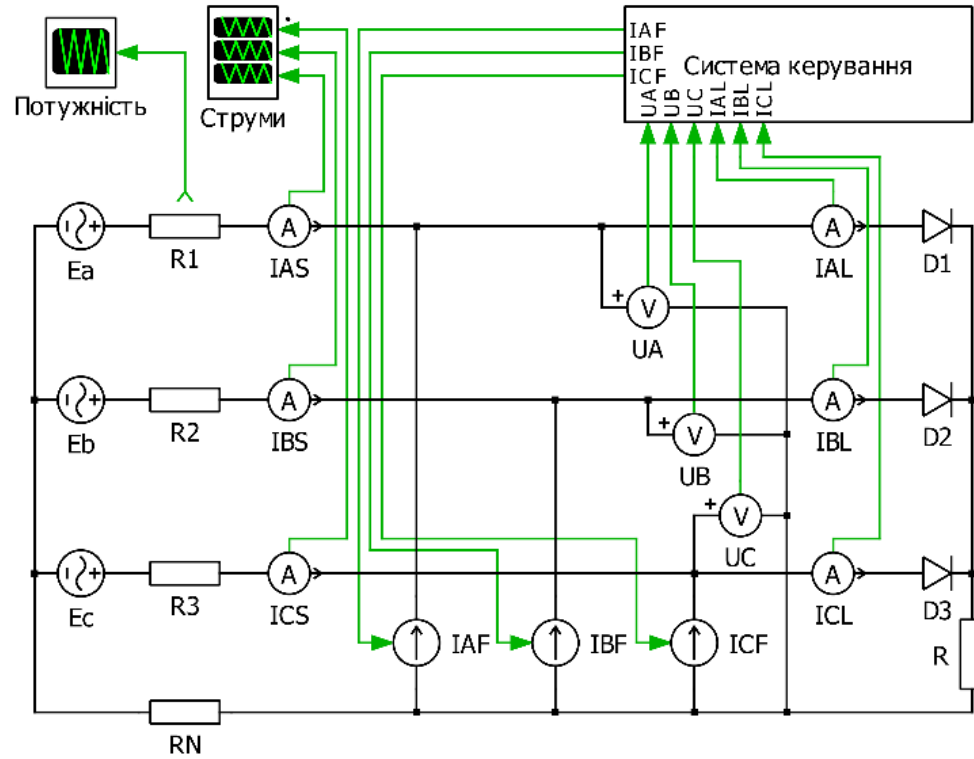
$$A = P / S.$$

Квадрат коефіцієнта потужності представляє співвідношення між мінімально можливими втратами та потужністю втрат даного навантаження

$$A^2 = \Delta P_{MIN} / \Delta P.$$

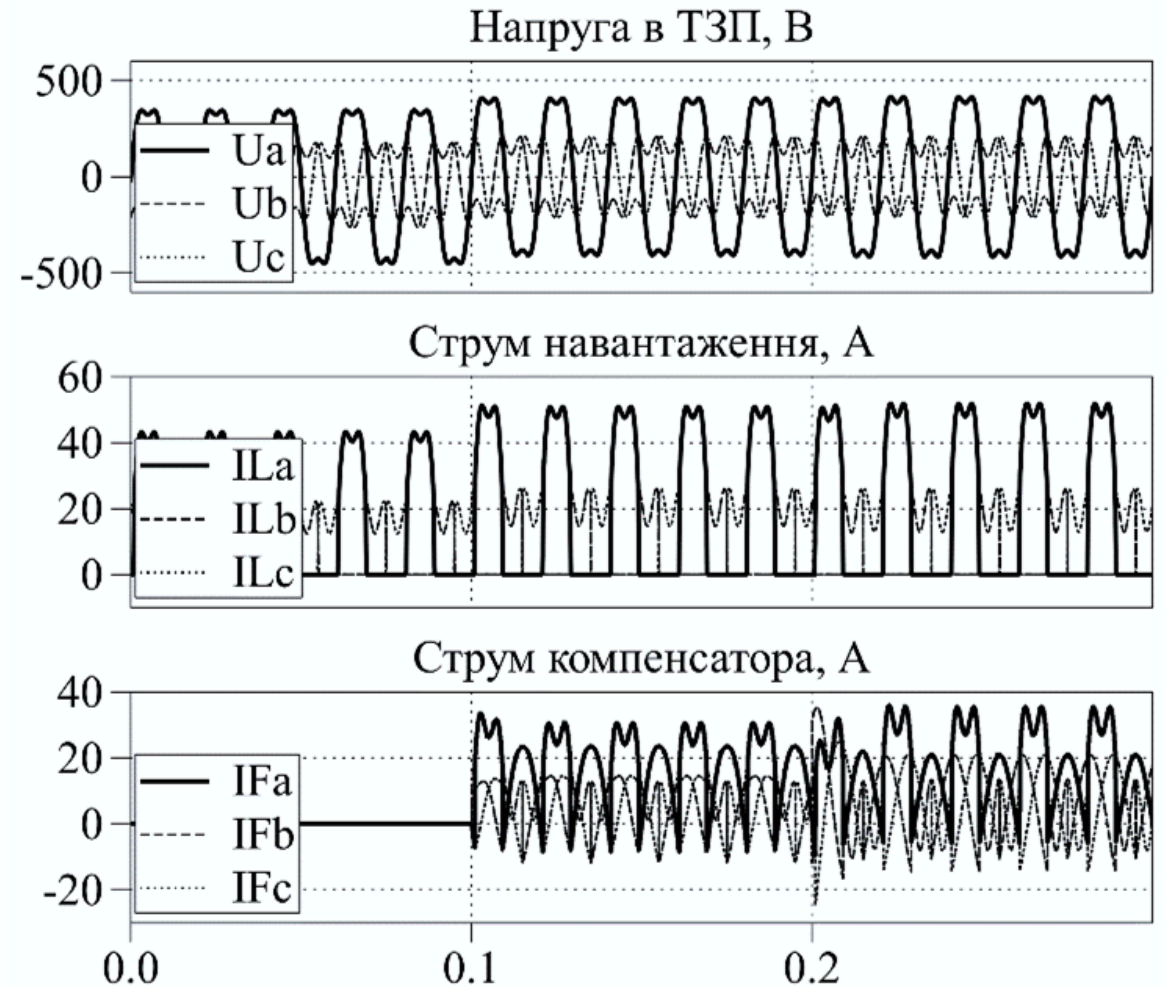
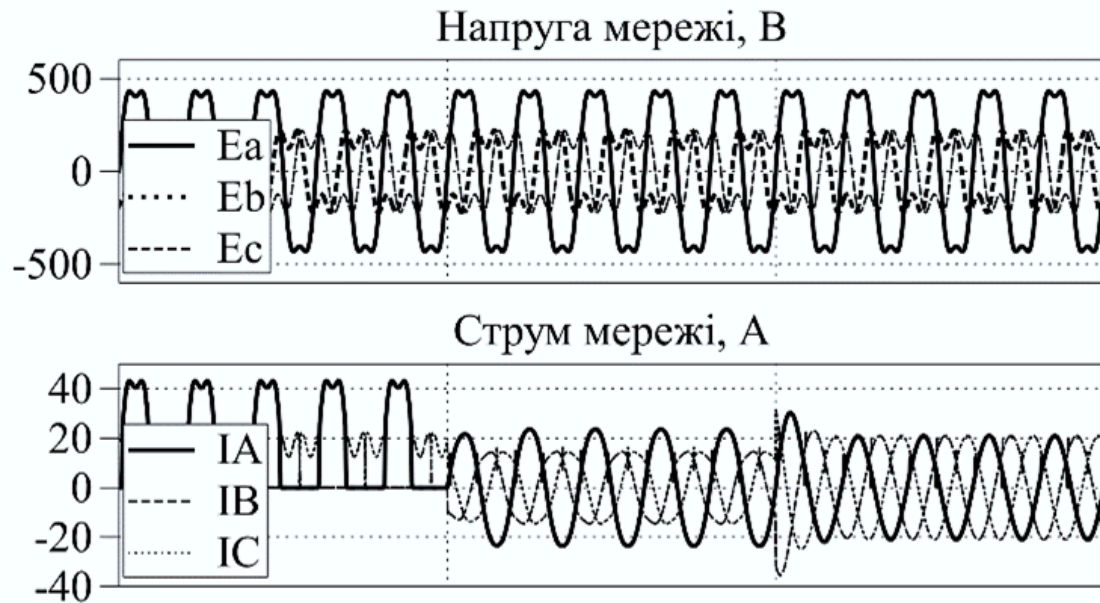
Експериментальна верифікація результатів дослідження

Результати моделювання в двох режимах роботи ПАФ, що через залежні джерела формує струми лінії передачі за різними способами

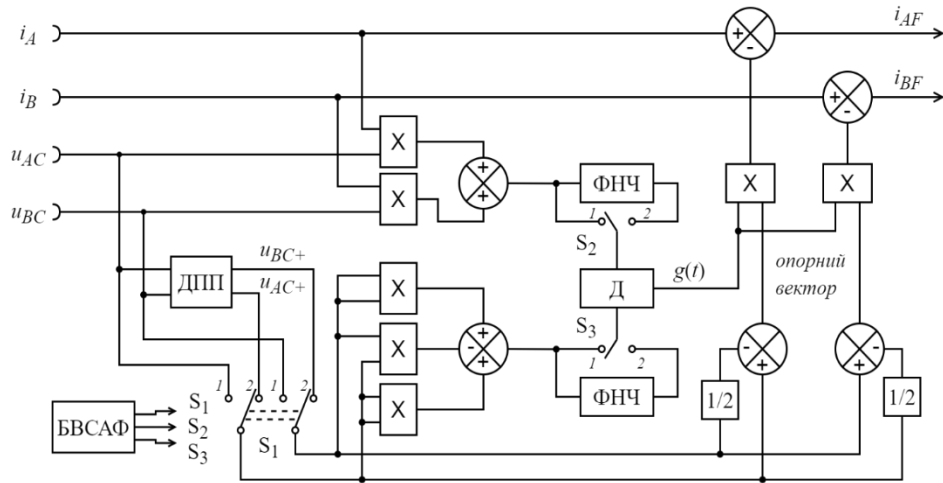
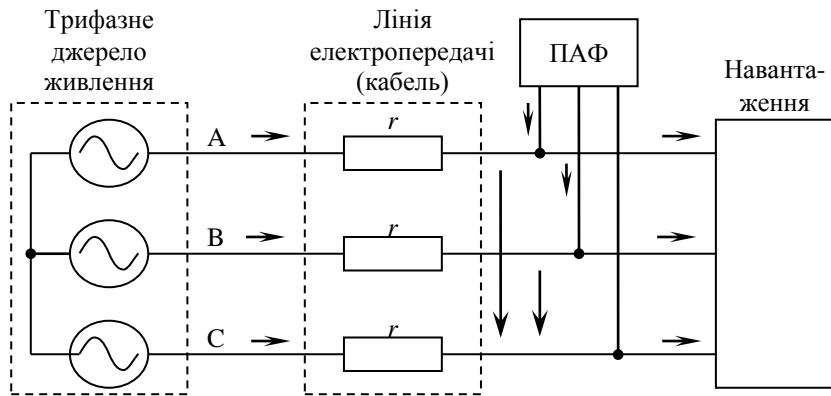


Експериментальна верифікація результатів дослідження

Результати моделювання в часовій області 0.1с – використання опорного вектора повної напруги 0.2с формуванням симетричних синусоїдних струмів джерела



КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ ТРИФАЗНОЇ ТРИПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ В СИСТЕМІ КООРДИНАТ МЕТОДУ ДВОХ ВАТМЕТРІВ



$$\mathbf{i}_{F1}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_a(t) = \begin{Bmatrix} i_A \\ i_B \end{Bmatrix} - g_{MM}(t) \begin{Bmatrix} u_{AC} - u_{BC} / 2 \\ u_{BC} - u_{AC} / 2 \end{Bmatrix},$$

$$g_{MM}(t) = (u_{AC}i_A + u_{BC}i_B) / (u_{AC}^2 - u_{AC}u_{BC} + u_{BC}^2)$$

$$\mathbf{i}_{F2}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{A+}(t) = \begin{Bmatrix} i_A \\ i_B \end{Bmatrix} - g_{II}(t) \begin{Bmatrix} u_{AC+} - u_{BC+} / 2 \\ u_{BC+} - u_{AC+} / 2 \end{Bmatrix},$$

$$g_{II}(t) = \int_T p(t)dt / \int_T (u_{AC}^2 - u_{AC}u_{BC} + u_{BC}^2)dt$$

$$\mathbf{i}_{F3}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{A+}(t) = \begin{Bmatrix} i_A \\ i_B \end{Bmatrix} - g_{IM}(t) \begin{Bmatrix} u_{AC+} - u_{BC+} / 2 \\ u_{BC+} - u_{AC+} / 2 \end{Bmatrix},$$

$$g_{IM}(t) = P / (u_{AC}^2 - u_{AC}u_{BC} + u_{BC}^2)$$

$$\mathbf{i}_{F4}(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_{A+}(t) = \begin{Bmatrix} i_A \\ i_B \end{Bmatrix} - g_{I+}(t) \begin{Bmatrix} u_{AC+} - u_{BC+} / 2 \\ u_{BC+} - u_{AC+} / 2 \end{Bmatrix},$$

$$g_{I+}(t) = P / (u_{AC+}^2 - u_{AC+}u_{BC+} + u_{BC+}^2); u_{AC+}, u_{BC+}$$

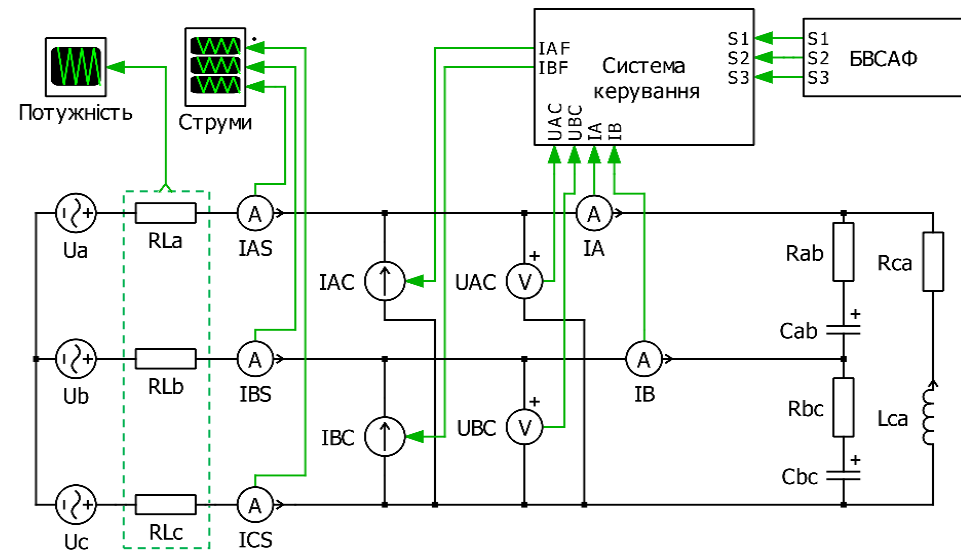
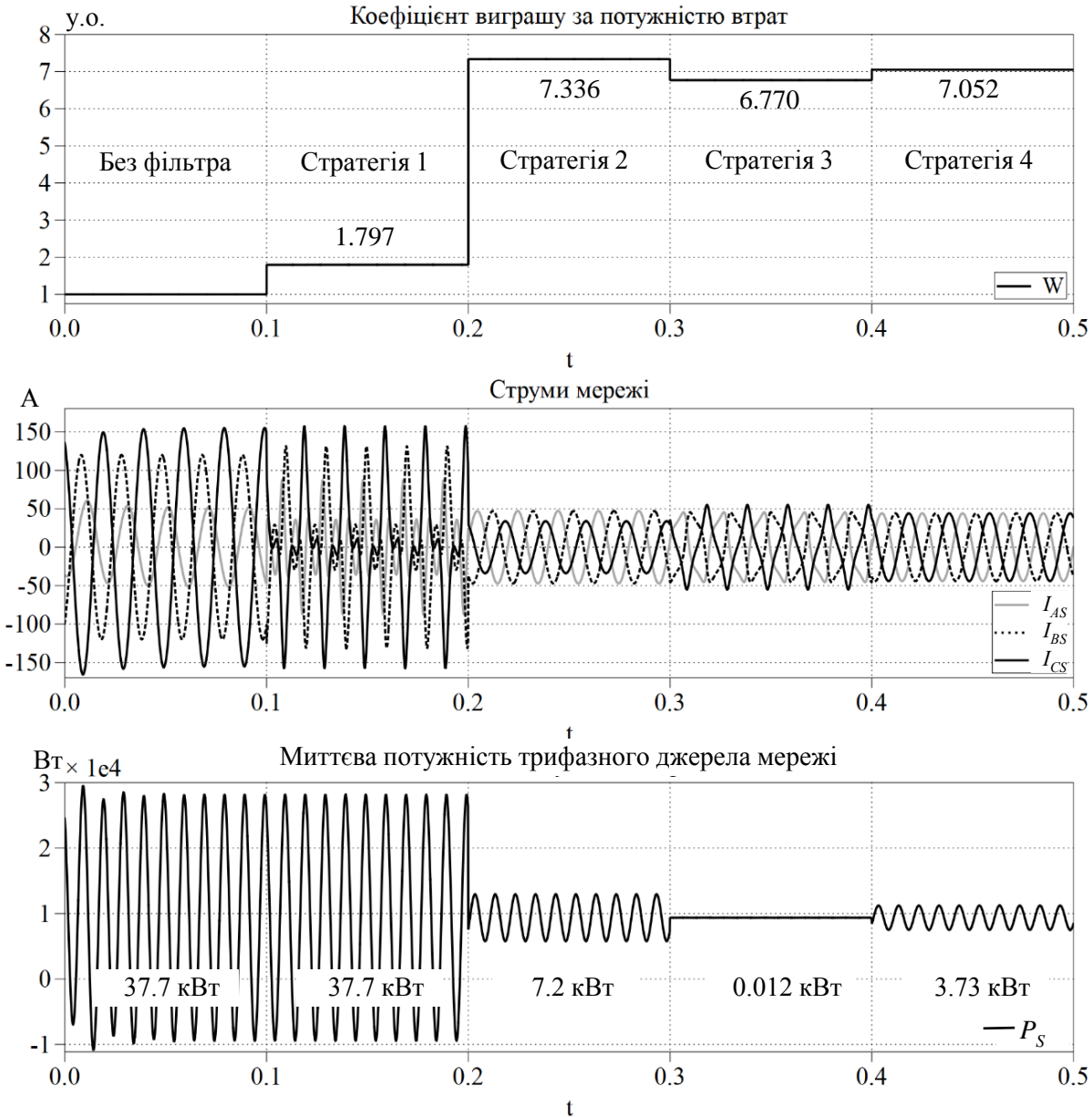
стратегія максимального виграшу за потужністю миттєвих втрат в лінії передачі порівняно з системою без фільтра

стратегія максимального виграшу за потужністю інтегральних втрат

стратегія, що повністю усуває пульсації миттєвої потужності трифазного джерела

стратегія забезпечує симетричні синусоїдні споживані струми трифазного джерела при довільних спотвореннях напруг живлення та несиметрії й нелінійності навантаження

Експериментальна верифікація результатів досліджень комбінованої системи керування ПАФ



- Стратегія 1:** підвищена енергоефективність за миттєвою потужністю втрат в лінії передачі, несинусоїдні струми, відсутність накопичувача
- Стратегія 2:** максимальна енергоефективність за інтегральною потужністю втрат в лінії передачі, синусоїдність споживаних струмів, необхідний накопичувач
- Стратегія 3:** підвищена енергоефективність за миттєвою потужністю втрат в лінії передачі, відсутність пульсацій миттєвої потужності трифазного джерела, необхідний накопичувач
- Стратегія 4:** підвищена енергоефективність за миттєвою потужністю втрат в лінії передачі, симетрія та синусоїдність споживаних струмів в умовах несиметрії джерела та навантаження, необхідний накопичувач

Висновки

- ▶ Теорія миттєвої потужності багатофазної системи електропостачання отримала подальший розвиток у шляхом обґрунтування нових формул для миттєвого активного струму, миттєвої повної потужності та миттєвого коефіцієнта потужності, враховуючи залежність коефіцієнта опору лінії електропередачі. За відсутності складових нульової послідовності векторів струму і напруги або рівності опору нейтралі нулю вони переходять у класичні формули теорії миттєвої потужності.
- ▶ Запропоновано комбіновану систему керування ПАФ в системі координат методу двох ватметрів, яка в залежності від умов використання реалізовує одну з чотирьох стратегій активної фільтрації, оптимальних за наступними критеріями: максимальна енергоефективність за миттєвою чи інтегральною потужністю втрат в лінії передачі, відсутність пульсацій миттєвої потужності трифазного джерела, симетрія та синусоїдність споживаних струмів в умовах несиметрії джерела та навантаження.
- ▶ Отримано нові співвідношення спрощеного, прямого розрахунку струмів компенсації силових активних фільтрів для використання в системах розподіленої генерації. Шляхом моделювання підтверджено адекватність запропонованих методів розрахунку струмів силових активних фільтрів.

Дякую за увагу !

