

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТУРА НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ КОМПЕНСОВАНОЇ МЕРЕЖІ

Кобазев В.П., Гребченко М.В., Иванова Л.І.
Донецький національний технічний університет
c12@elf.dgtu.donetsk.ua

The paper describes the frequency-response characteristics of compensated electric network at sudden feeding on zero sequence loop the phase voltage over supplementary capacity. The expressions for their calculation are got. By these expressions the frequency-response characteristics at different values of high quality network factor at the changing of tuning degree of arc-suppression reactor are calculated and built with help of COMPUTER. Given results are offered to take into account at the elaboration of phase-measuring devices for relay protection and automation.

Постановка задачі. В електричних мережах напругою 6, 10, 35 кВ для підвищення надійності широко використовуються пристрої захисту від однофазних замикань на землю і автоматичної компенсації ємнісного струму мережі за допомогою дугогасного реактора [1, 2]. При цьому як в пристроях релейного захисту, так і системах автоматичного настроювання дугогасного реактора використовується вимірювання в усталеному режимі фази сигналів, що контролюються. При зміні параметрів мережі змінюються також і амплітуди і фази сигналів, що контролюються вказаними пристроями. Для відстроювання від впливу перехідного процесу в цих пристроях використовується витримка часу, яка вибирається апріорно. Для мінімізації витримки часу необхідно врахування динамічних властивостей мережі. Таким чином аналіз динамічних характеристик компенсованої мережі є актуальна задача.

Аналіз останніх досліджень. При розгляді математичної моделі, що описує функціонування пристроїв релейного захисту і автоматики, що використовують фазовий принцип при побудові вимірювальних органів, вплив динамічних властивостей мережі не враховується [3, 4]. Однак при розробці нових швидкодіючих пристроїв ця витримка повинна бути мінімізована.

Задача досліджень. Отримати співвідношення для розрахунку перехідних амплітудних і фазових характеристик компенсованої електричної мережі в залежності від ступеня настроювання дугогасного реактора ν і коефіцієнта добротності мережі d . Виконати аналіз впливу параметрів мережі на її перехідну характеристику.

Виклад основного матеріалу. Для розрахунку перехідних характеристик контуру нульової послідовності мережі розглянемо його підключення до фазної напруги через додаткову ємність. Для цього скористаємось однофазною схемою заміщення, яка приведена на рис. 1.

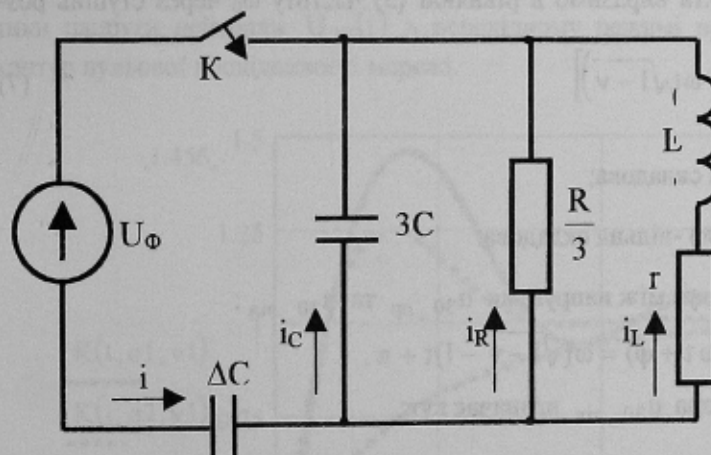


Рис. 1 – Однофазна схема заміщення мережі

на скласти наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 1) \quad U_{30} &= \frac{1}{3C} \int i_C \cdot dt & 2) \quad U_{30} &= i_R \cdot \frac{R}{3} \\
 3) \quad U_{30} &= L \cdot \frac{di_L}{dt} + i_L \cdot r & 4) \quad U_{\phi} &= \frac{1}{\Delta C} \int i \cdot dt \cdot U_{30} \\
 5) \quad i &= i_L + i_C + i_R
 \end{aligned} \tag{1}$$

Після елементарних перетворень рівняння (1) з метою встановлення зв'язка фазної напруги з напругою зсуву нейтралі при врахуванні того, що $\Delta C \leq 3C$ і $r \leq R$, одержимо таке диференціальне рівняння:

$$\frac{d^2 U_{30}}{dt^2} + \left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC} \right) \cdot \frac{dU_{30}}{dt} + \frac{1}{3CL} \cdot U_{30} = \frac{\Delta C}{3C} \cdot \frac{d^2 U_{\phi}}{dt^2} + \frac{\Delta C r}{3CL} \cdot \frac{dU_{\phi}}{dt} \quad (2)$$

Перехідний процес напруги $U_{30}(t)$ у розглянутому електричному колі (рис.1) можна одержати шляхом аналітичного рішення рівняння (2), що є неоднорідним лінійним диференціальним рівнянням другого порядку. Рішення цього рівняння представляється сумою загального рішення однорідного диференціального рівняння:

$$\frac{d^2 U_{30}}{dt^2} + \left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC} \right) \cdot \frac{dU_{30}}{dt} + \frac{1}{3CL} \cdot U_{30} = 0 \quad (3)$$

і часткового рішення неоднорідного рівняння (2). Рівняння (3) характеризує вільну складової напруги $U_{30_віль}(t)$. Приватним рішенням неоднорідного рівняння (2) при східчастій зміні фазної напруги U_{ϕ} буде нове значення напруги $U_{30_пр}(t)$, що установилося після закінчення перехідного процесу. Таким чином, перехідна напруга $U_{30}(t)$ є сумою примушеної і вільної складових:

$$U_{30}(t) = U_{30_пр}(t) + U_{30_віль}(t) \quad (4)$$

Вирішуючи рівняння (3) класичним методом з урахуванням початкових умов і законів комутації, одержимо вираз для перехідного процесу напруги нейтралі:

$$U_{30}(t) = \sqrt{2} U_{30}(v) \left[\sin(\omega t + \varphi) - e^{-\sigma t} \sin(\omega_0 t + \varphi) \right] \quad (5)$$

де $U_{30}(v)$ ефективне значення напруги нейтралі; φ - фазовий кут напруги нейтралі; декремент затухання вільної складової:

$$\sigma = \frac{r}{2L} + \frac{1}{2RC} \approx \frac{\omega d}{2} \text{ - дійсна частина кореня характеристичного рівняння (3);} \quad (6)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\left(\frac{r}{2L} + \frac{1}{2RC} \right)^2 - \frac{1}{3LC}} \text{ - мніма частина кореня того ж характеристичного рівняння або кутова}$$

частота вільних коливань у контурі RLC.

Напруга $U_{30}(v)$ і кут φ є статичними характеристиками об'єкта в залежності від ступеня розстроювання компенсації:

$$U_{30}(v) = \frac{\delta C}{\sqrt{d^2 + v^2}} U_{\phi} \quad \varphi = \arctg \frac{v}{d} \quad \text{де } \delta = \frac{\Delta C}{3C} \text{ - відносна ємнісна асиметрія мережі.}$$

Для аналізу перехідних характеристик об'єкта виразимо в рівнянні (5) частоту ω_0 через ступінь розстройки v . В результаті отримаємо:

$$U_{30}(t) = \sqrt{2} U_{30}(v) \left[\sin(\omega t + \varphi) - e^{-\sigma t} \cdot \sin(\varphi + \omega t \sqrt{1-v}) \right] \quad (7)$$

В цьому рівнянні:

$$u_{30_пр} = \sqrt{2} \cdot U_{30}(v) \cdot \sin(\omega t + \varphi) \text{ - примусова складова;}$$

$$u_{30_віль} = \sqrt{2} \cdot U_{30}(v) \cdot e^{-\sigma t} \sin(\omega \sqrt{1-v} + \gamma + \pi) \text{ - вільна складова.}$$

В будь-який момент часу перехідного процесу кут між напругами $u_{30_пр}$ та $u_{30_віль}$:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi_{віль}(t) - \varphi_{пр}(t) = \omega \sqrt{1-v} \cdot t + \pi - (\omega t + \varphi) = \omega(\sqrt{1-v} - 1)t + \pi.$$

Таким чином, в момент часу t положення вектора $u_{30_віль}$ визначає кут:

$$\varphi_{віль}(t) = \varphi + \Delta\varphi(t) = \pi + \varphi = \omega(\sqrt{1-v} - 1)t.$$

Для визначення кута напруги зсуву нейтралі залежно від часу визначимо проекції векторів $u_{30_пр}$ та $u_{30_віль}$ на вісі x і y декартової системи координат.

$$\text{Вектор } \bar{U}_{віль}: \quad U_{віль_x} = \sqrt{2} U_{30}(v) \cdot e^{-\sigma t} \cdot \sin(\pi + \varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t),$$

$$U_{віль_y} = \sqrt{2} U_{30}(v) \cdot e^{-\sigma t} \cdot \cos(\pi + \varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t);$$

$$\text{вектор } \bar{U}_{пр}: \quad U_{пр_x} = \sqrt{2} \cdot U_{30}(v) \cdot \sin(\varphi),$$

$$U_{пр_y} = \sqrt{2} \cdot U_{30}(v) \cdot \cos(\varphi).$$

З врахуванням проекцій векторів знайдемо кут напруги зсуву нейтралі в момент часу t :

$$\begin{aligned} \varphi'(t) &= \operatorname{arctg} \frac{U_{\text{вил}_x} + U_{\text{пр}_x}}{U_{\text{вил}_y} + U_{\text{пр}_y}} = \operatorname{arctg} \frac{\sin(\varphi) + e^{-\sigma t} \cdot \sin(\pi + \varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t)}{\cos(\varphi) + e^{-\sigma t} \cdot \cos(\pi + \varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t)} = \\ &= \operatorname{arctg} \frac{\sin(\varphi) - e^{-\sigma t} \cdot \sin(\varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t)}{\cos(\varphi) - e^{-\sigma t} \cdot \cos(\varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t)}. \end{aligned}$$

Усі вектори, що наведені на рис. 2.2, рис. 2.3 обертаються проти стрілки годинника, як це прийнято для зображення синусоїдальних величин на комплексній площині. Однак, вектор вільної складової напруги нейтралі або випереджає, або відстає від вектора примусової складової в залежності від знака розстройки дугогасного реактора.

Абсолютні значення вектора \bar{U}_{30} залежно від часу знайдемо за співвідношенням:

$$\begin{aligned} U_{30}(t) &= \sqrt{(U_{\text{вил}_x} + U_{\text{пр}_x})^2 + (U_{\text{вил}_y} + U_{\text{пр}_y})^2} = \sqrt{2} U_{30}(v) \cdot \\ &\cdot \sqrt{(\sin \varphi - e^{-\sigma t} \cdot \sin(\varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t))^2 + (\cos(\varphi) - e^{-\sigma t} \cdot \cos(\varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t))^2}. \end{aligned}$$

Після перетворень отриманого виразу отримуємо співвідношення для напруги зсуву нейтралі компенсованої мережі залежно від часу:

$$U_{30}(t) = \sqrt{2} U_{30}(v) \cdot \sqrt{1 - e^{-\sigma t} \cdot (\cos(\omega \cdot (\sqrt{1-v} - 1) \cdot t) + e^{-\sigma t})}.$$

У показовій формі рівняння (7) має вигляд

$$U_{30}(t) = \sqrt{2} U_{30}(v) e^{j(\omega t + \varphi)} - \sqrt{2} U_{30}(v) e^{-\frac{\omega d}{2} t} \cdot e^{j(\varphi + \omega t \sqrt{1-v})} \quad (8)$$

Для побудови фазових перехідних характеристик об'єкта скористаємося рівнянням (8). Після нескладних перетворень одержимо:

$$U_{30}(t) = \sqrt{2} U_{30}(v) K(t) e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad \text{де} \quad (9)$$

$$K(t) = \sqrt{1 - e^{-\sigma t} (2 \cos \omega \cdot (\sqrt{1-v} - 1) \cdot t + e^{-\sigma t})}, \quad (10)$$

$$\varphi'(t) = \operatorname{arctg} \frac{\sin(\varphi) - e^{-\sigma t} \cdot \sin(\varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t)}{\cos(\varphi) - e^{-\sigma t} \cdot \cos(\varphi + \omega(\sqrt{1-v} - 1)t)}. \quad (11)$$

На рис. 2 – рис. 6 згідно співвідношень (10) і (11) побудовані амплітудні $K(t)$ і фазові $\varphi'(t)$ характеристики напруги нейтралі $U_{30}(t)$ в перехідному режимі при раптовій подачі синусоїдальної напруги U_{ϕ} на контур нульової послідовності мережі.

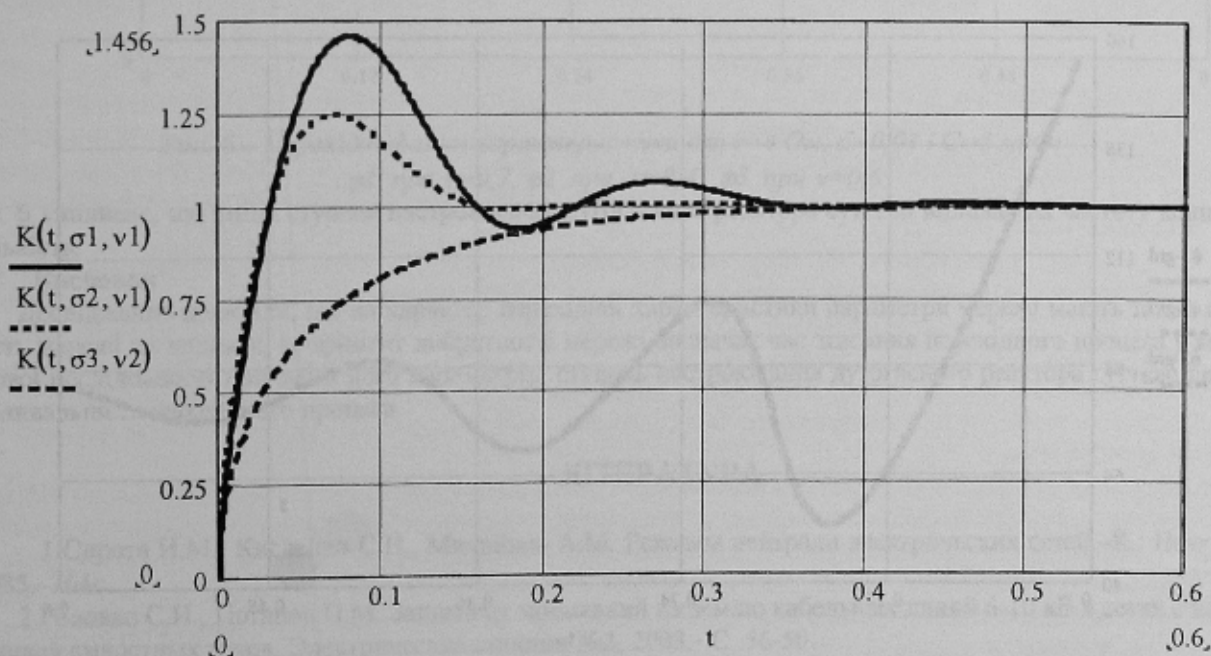


Рис. 2 – Перехідні амплітудні характеристики: $K(t, \sigma 1, v 1)$ для $C=6$ мкФ і $r=4$ Ом при $v=0,2$ $d=0,03$; $K(t, \sigma 2, v 1)$ при $v=0,2$ $d=0,05$; $K(t, \sigma 3, v 2)$ при $v=0,0$ $d=0,03$

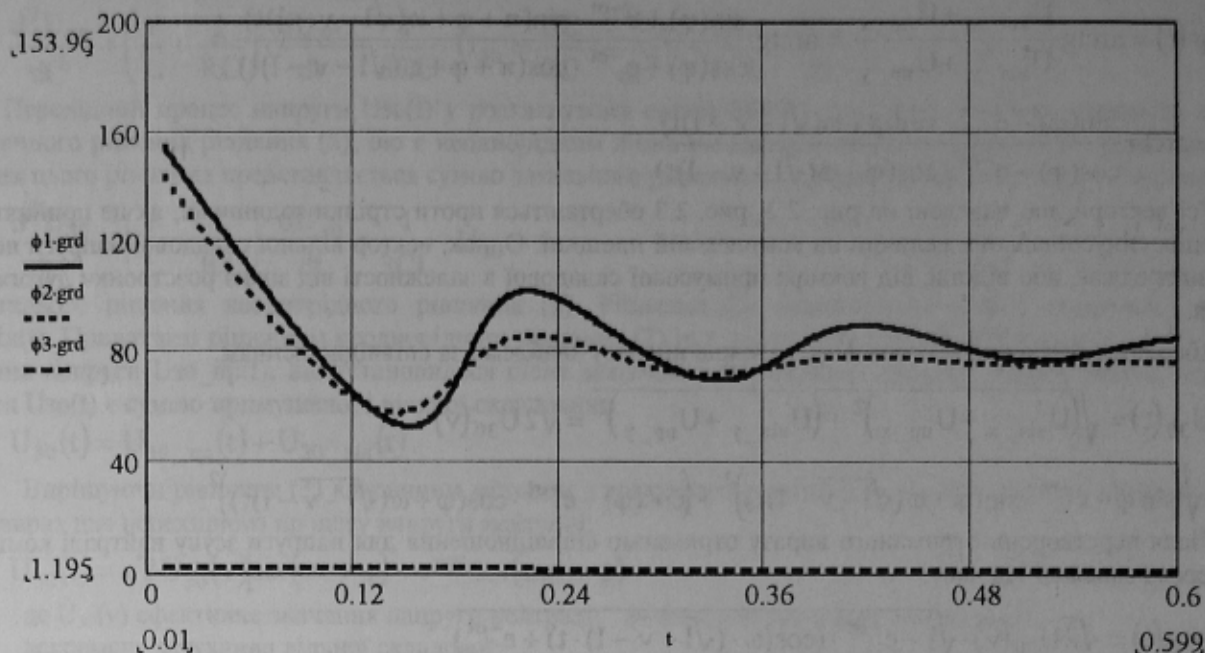


Рис.3 – Перехідні фазові характеристики для $C=6$ мкФ і $r=4$ Ом: ϕ_1 при $\nu=0,2$ $d=0,03$; ϕ_2 при $\nu=0,2$ $d=0,05$; ϕ_3 при $\nu=0,1$ $d=0,03$.

Розрахунок $K(t)$ при $d = 0,05$ згідно рис. 2 показав, що час перехідного процесу складає $t = 3\tau = 0,38$ с. У пристроях релейного захисту і системах вимірювання ступеня настроювання дугогасного реактора по фазових характеристиках напруги нейтралі вихідним параметром об'єкта, на який повинна реагувати вимірювальна схема, є фазовий кут ϕ' . Тому перехідні характеристики компенсованої електричної мережі необхідно враховувати при розробці фазових вимірювальних пристроїв для визначення ступеня настроювання дугогасного реактора або напрямку току замикання на землю в пристроях захисту.

Розглянемо вплив ємності мережі, добротності і ступеня настроювання дугогасного реактора. Для цього виконаємо розрахунки фазових характеристик при умові, що змінюється тільки той параметр, вплив якого досліджується. Результати розрахунку приведені на рис. 4 ÷ рис. 6.

На рис. 4 показаний вплив ємності мережі на вид фазової характеристики. Результати розрахунку свідчать, що усі три кривих співпадають, тому можна вважати, що величина ємності мережі на вид фазової характеристики не впливає. На рис. 5 приведені фазові характеристики побудовані при трьох різних значеннях коефіцієнта добротності мережі. Аналіз кривих показує, що добротність суттєво впливає на час згасання перехідного процесу.

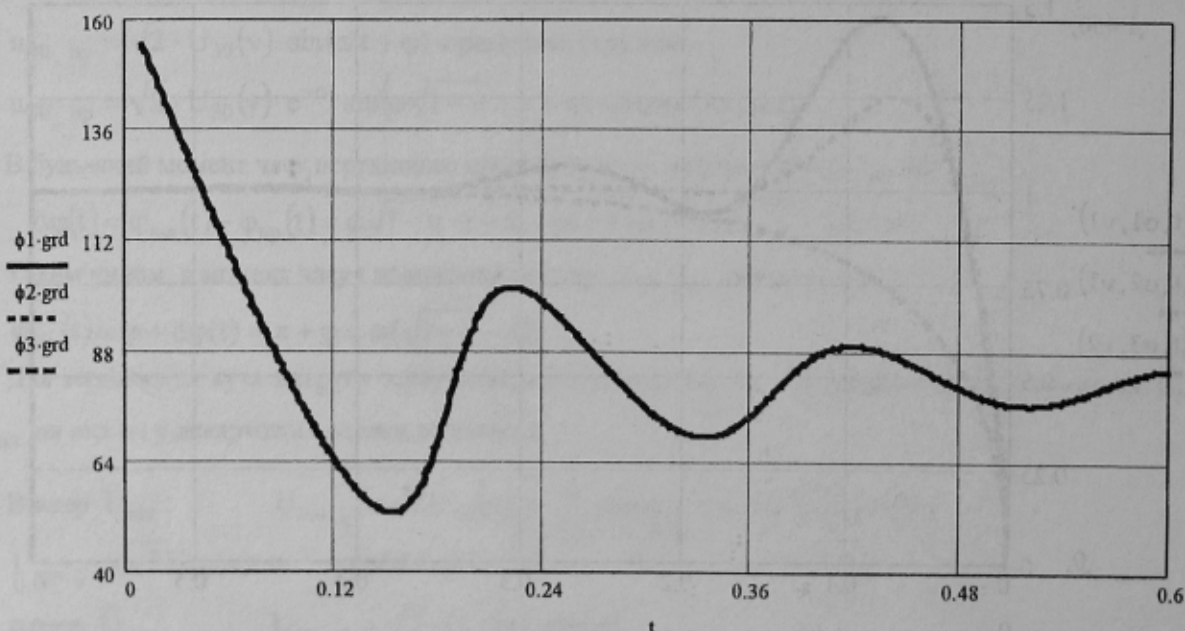


Рис.4 – Перехідні фазові характеристики для $r=4$ Ом, $\nu=0,2$ і $d=0,03$: ϕ_1 при $C=3$ мкФ, ϕ_2 при $C=6$ мкФ, ϕ_3 при $C=12$ мкФ.

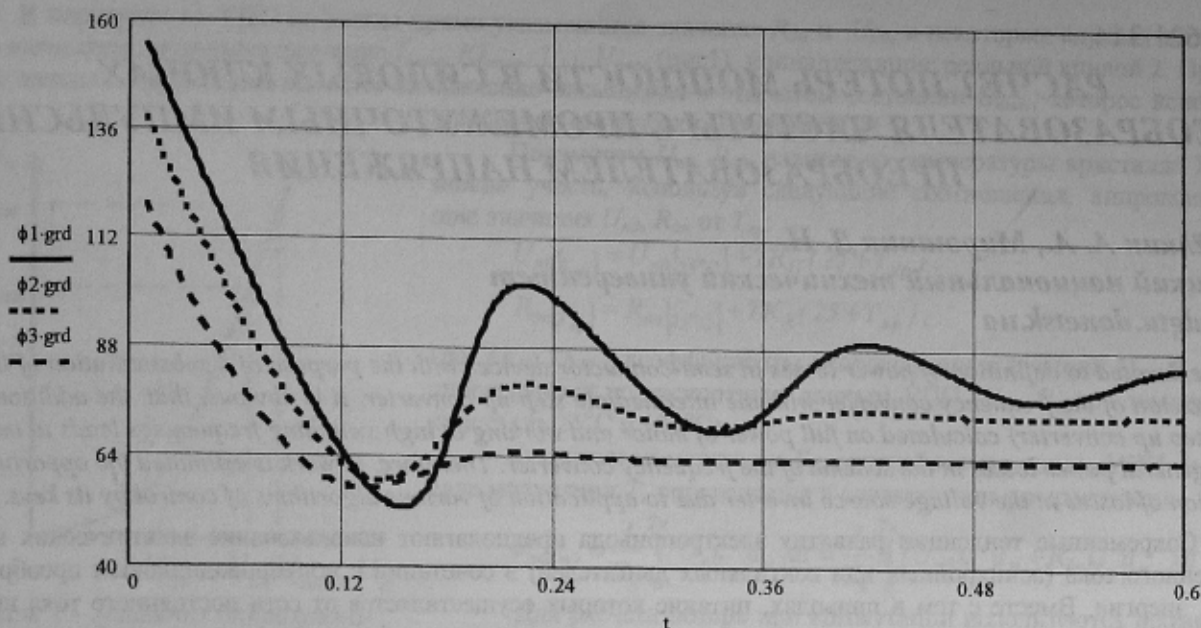


Рис. 5 – Перехідні фазові характеристики для $r=4$ Ом, $v=0,2$ і $C=3$ мкФ:
 φ_1 при $d=0,03$, φ_2 при $d=0,06$, φ_3 при $d=0,1$.

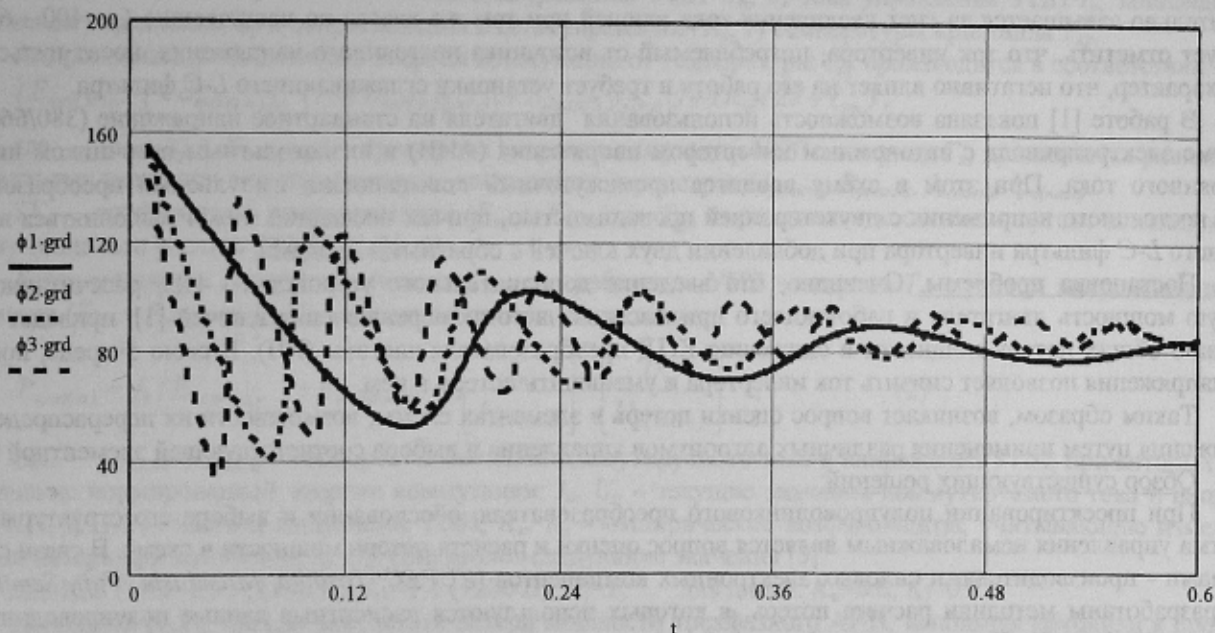


Рис. 6 – Перехідні фазові характеристики для $r=4$ Ом, $d=0,03$ і $C=3$ мкФ:
 φ_1 при $v=0,2$, φ_2 при $v=0,4$, φ_3 при $v=0,6$

З рис. 6 випливає, що зміна ступеня настроювання дугогасного реактора суттєво впливає на частоту коливань і їх кількість.

Висновок

Дослідження показали, що на характер перехідної характеристики параметри мережі мають такий вплив: ємність мережі не впливає, коефіцієнт добротності мережі визначає час згасання перехідного процесу у контурі нульової послідовності при зміні його параметрів, ступень настроювання дугогасного реактора суттєво впливає на коливальність перехідного процесу.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей.–К.: Наук. думка, 1985.–264с.
- 2 Головки С.И., Потапов П.М. Защита от замыканий на землю кабельных линий 6-10 кВ в сетях с компенсацией емкостных токов. Электрические станции №2, 2003.- С. 56-50.
- 3 Ершов А.М., Петров С.А. Амплитудно-фазовые характеристики сети. Энергетика. Известия вузов №5, 1980.- С. 23-27.
- 4 Коневский Я.М. Защита от однофазных замыканий в сетях 6 кВ собственных нужд ТЭЦ с двумя режимами заземления нейтрали. Электрические станции №10, 2003.- С. 46-49.