

# КОРЕКЦІЯ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДУГОГАСНОГО РЕАКТОРА З ПОШУКОВИМИ КОЛИВАННЯМИ

Кобазев В.П.

Донецький національний технічний університет  
c12@elf.dgtu.donetsk.ua

The paper describes the method of the decreasing of influence of free component of transient condition on accuracy of determination of tuning of arc-suppression reactor by extreme regulator with searching oscillations. Offers to bring regulator error down at the expense of the decreasing of ratio between duration of rectangular impulse and pause in each half period of searching oscillations.

**Постановка задачі.** У повітряних і кабельно – повітряних електричних мережах напругою 6, 10, 35 кВ для настроювання дугогасного реактора (ДР) доцільно застосовувати екстремальний регулятор [1]. Він не чутливий до величини природної несиметрії мережі щодо землі. У таких регуляторах для пошуку екстремальної точки на амплітудній характеристиці компенсованої мережі ( $U_{30}(v)$ , де  $v$  ступінь настроювання ДР) можуть застосовуватися пошукові періодичні коливання регульованого параметра: індуктивності ДР. При цьому виникає примусова і вільна складова перехідного процесу. Вільна складова визначається динамічними властивостями контура нульової послідовності. Вона суттєво впливає на похибку визначення ступеня настроювання дугогасного реактора. Тому виникає задача пошуку технічних рішень, що дозволяють зменшити вплив вільної складової на роботу екстремального регулятора.

**Аналіз останніх досліджень.** Штучне зниження добротності контура нульової послідовності в нормальному режимі роботи мережі дозволяє усунути похибку в екстремальному регуляторі при достатньо високій частоті пошуку. Але для цього необхідна додаткова апаратура, що ускладнює систему регулювання дугогасного реактора. Крім того, в момент замикання на землю контур нульової послідовності буде мати низьку добротність, тому, незважаючи на резонансне настроювання реактора, дугове замикання на землю буде відбуватися практично у кожному півперіоді напруги пошкодженої фази.

**Задача досліджень.** Знайти і обґрунтувати засіб зменшення впливу вільної складової на точність визначення настройки дугогасного реактора екстремальним регулятором з пошуковими коливаннями, що не пов'язаний зі зменшенням добротності контура нульової послідовності.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 приведена структурна схема автоматичного регулятора дугогасного реактора з безперервними пошуковими коливаннями.

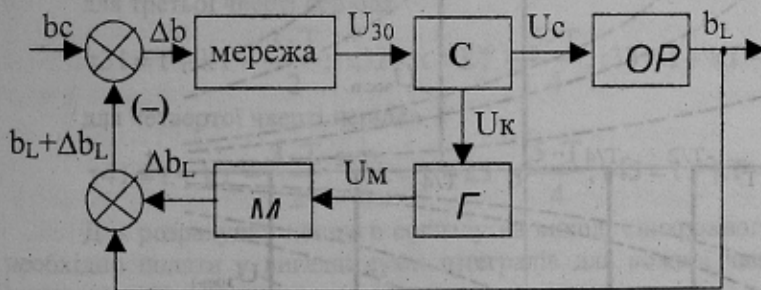


Рис. 1 – Структурна схема

Для пошуку екстремальної точки на кривій  $U_{30}(v)$  в мережі створюються примусові коливання індуктивної провідності  $b_L$  дугогасного реактора на величину  $\Delta b_L$  з частотою пошуку  $F$ . Ця частота задається модулятором  $M$ , який керується періодичним прямокутним сигналом  $u_m$  від генератора пошукових коливань  $\Gamma$ . Для цього к частині обмотки дугогасного реактора або послідовно з нею може підключатися додаткова індуктивність. При паралельному підключенні провідність  $b_L$  збільшується, а при послідовному зменшується на величину  $\Delta b_L$ . На рис. 1 показаний випадок коли до дугогасного реактора паралельно підключається додаткова індуктивність з провідністю  $\Delta b_L$ .

Періодична зміна індуктивності дугогасного реактора викликає низькочастотну модуляцію напруги нейтралі  $U_{30}(t)$ . При переході через екстремум фаза низькочастотної складової, що огинає напругу нейтралі, змінюється на 180 ел. град. Порівняння фази низькочастотної складової напруги з фазою генератора пошукових коливань відбувається в синхронному детекторі СД. На його виході з'являється керуючий сигнал  $U_c$ , постійна складова якого пропорційна похідній статичної характеристики компенсованої мережі  $U_{30}(v)$ .

Пошукові коливання індуктивності ДР змінюють параметр  $v$  щодо поточного середнього значення  $v_{cp}$  на малу величину  $\pm \Delta v$  з періодом  $T = 1/F$ :

$$v = v_{cp} + \Delta v \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \cdot \left| \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right|^{-1} = v_{cp} + \Delta v \cdot \sin(\Omega t) \cdot |\sin(\Omega t)|^{-1} \quad (1)$$

При цьому виникають зміни напруги нейтралі мережі  $U_{30}$ . При ємнісній асиметрії  $\Delta C$  в одній з фаз мережі статична характеристика компенсованої мережі визначається таким співвідношенням [2]:

$$U_{30}(v) = \frac{\delta C}{\sqrt{d^2 + v^2}} \cdot U_{\Phi}, \quad (2)$$

де  $\delta C$  – відносна емнісна асиметрія, дорівнює  $\delta C = \frac{\Delta C}{3C}$ .

Прирошення напруги  $\Delta U_{30}$  на вході екстремального регулятора при зміні ступеня настроювання реактора на величину  $\pm \Delta v$  (1) отримаємо за допомогою диференціювання статичної характеристики об'єкта регулювання:

$$\Delta U_{30}(v) = \frac{dU_{30}}{dv} \Delta v = -\frac{\delta C \cdot v \cdot \Delta v}{(d^2 + v^2)^{3/2}} \cdot U_{\Phi}.$$

Залежність напруги сигналу  $U_C(v)$  на виході екстремального детектора від ступеня настроювання  $v$  отримаємо диференціюванням  $U'_{30}(v)$  статичної характеристики об'єкта (2). Отримана характеристика відповідає екстремальному регулятору крокового типу, де кожний пошуковий крок у зміні регульованого параметра може тривати відносно великий час. Однак у випадку, що розглядається, використовуються пошукові коливання для того, щоб скоротити час на формування вихідного сигналу регулятора і таким чином отримати збільшення його швидкодії. В такому регуляторі статична характеристика сигналу на його виході  $U_C(v)$  буде відрізнятися від ідеальної  $U'_{30}(v)$  і може мати дві точки стійкого положення, що визначають зону похибки регулятора. Ширина цієї зони залежить від обраної частоти пошуку  $F$  і добротності контура нульової послідовності  $d$ . Природа цієї погрішності пов'язана з динамічними властивостями об'єкта регулювання, оскільки він знаходиться завжди в стані безупинного руху під дією пошукових коливань параметра, що регулюється. Причому цей рух має змушену і вільну складові. Вільна складова загасає по експоненті з показником  $\sigma t$ . Декремент згасання  $\sigma$  визначається динамічними властивостями контуру нульової послідовності.

Похибку екстремального регулятора з пошуковими коливаннями можна усунути без штучного зниження добротності контуру нульової послідовності мережі. Для цього необхідно при модуляції опорного контуру нульової послідовності забезпечити деяку витримку часу, що необхідна для згасання вільної складової, відносно з часом її збудження. Досягається це за рахунок зменшення співвідношення тривалостей прямокутного імпульсу і паузи у півперіоді пошукового коливання. У такому разі у кожному півперіоді крім імпульсу буде ще і пауза (рис. 2).

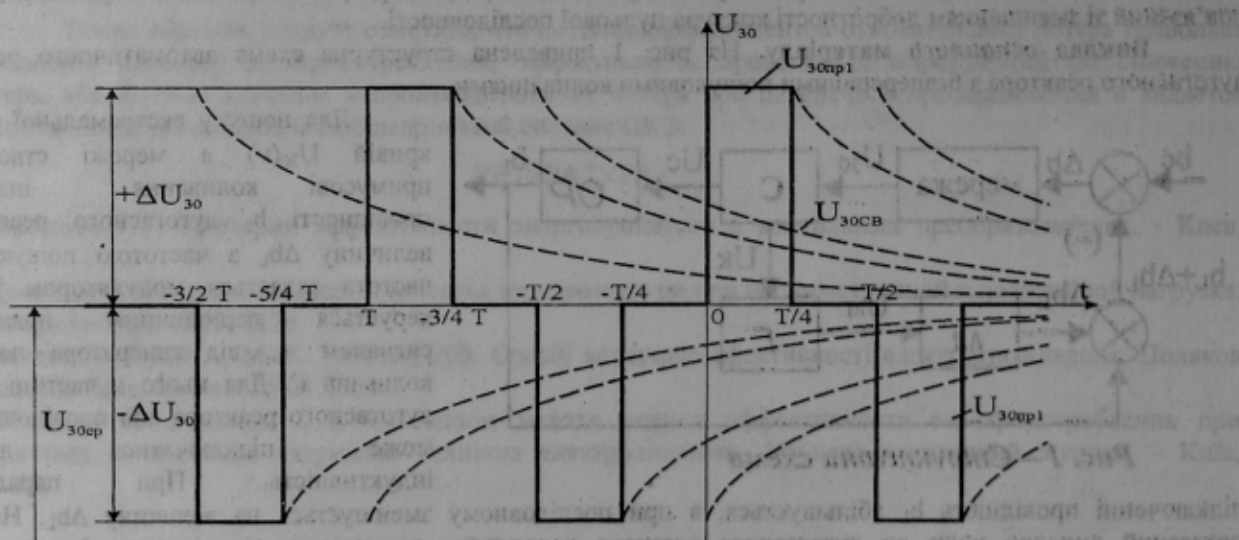


Рисунок 2 Часові діаграми впливу, що модулює

Примусова амплітудна модуляція напруги зміщення нейтралі  $\pm \Delta U_{30}$  відносно середнього значення  $U_{30cp}$  по формі повторює пошукові коливання  $\pm \Delta v$  параметра  $v$ , а по тривалості рівна половині кожного додатного і від'ємного півперіоду пошукових коливань (рис. 2).

Ефективність нового імпульсу пошукових коливань перевіримо за допомогою розглянутого у [3] методу. На вхід синхронного детектора екстремального регулятора подаються дві напруги: комутуюча прямокутна напруга  $u_K(t) = \sin \Omega t \cdot |\sin \Omega t|^{-1}$  і випростана синусоїдальна напруга нейтралі  $u_{30}(t)$ . Напруга сигналу на виході детектора розраховується по співвідношенню:

$$(1) \quad U_C(v) = \int_0^T U_K(t) \cdot |U_{30}(t)| \cdot dt.$$



Таким чином, задача визначення вихідного сигналу детектора полягає в розрахунку напруги  $u_{30}(t)$ , яке складається з примусової і вільної складових.

Прямокутні коливання  $\pm \Delta v$  параметра  $v$  при новому імпульсі викликають примусову прямокутну модуляцію синусоїдальної напруги  $u_{30}(t)$  на протязі першої і третьої чвертин періода пошукових коливань (рис. 3):

$$u_{30}(t)_{\text{пр1}} = \sqrt{2} \cdot [U_{30}(v) + \Delta U_{30}(v)] \cdot \sin \omega t,$$

$$u_{30}(t)_{\text{пр3}} = \sqrt{2} \cdot [U_{30}(v) - \Delta U_{30}(v)] \cdot \sin \omega t.$$

Примусова амплітудна модуляція напруги нейтралі  $\Delta U_{30}(v)$  розраховується по співвідношенню:

$$\Delta U_{30}(v) = \frac{\sin \Omega t}{|\sin \Omega t|} \cdot \frac{dU_{30}}{dv} \cdot \Delta v,$$

де значення напруги  $U_{30}(v)$  визначається по статичній характеристиці компенсованої мережі (2).

За термін другої і четвертої чверті періоду примусова амплітудна модуляція  $\Delta U_{30}(v)$  відсутня, тому примусова складова напруги  $u_{30}(t)$  буде визначатися співвідношенням:

$$u_{30}(t)_{\text{пр2}} = u_{30}(t)_{\text{пр4}} = \sqrt{2} \cdot U_{30}(v) \cdot \sin \omega t.$$

Вільні складові в кожній чверті розділимо на чотири суми. Аргументи синуса  $\tau$  кожної суми визначаються по рис. 3. Аналогічно з попереднім випадком маємо такі вирази для вільної складової  $u_{30}(t)$  в першій чверті періода:

$$u_{30}(t)_{\text{св1}} = \sqrt{2} \cdot \Delta U_{30}(v) \cdot \left[ \sum_{k=1}^N e^{-\sigma \tau_{11}} \sin(\omega \tau_{11} \sqrt{1-v}) + \sum_{k=1}^N e^{-\sigma \tau_{12}} \sin(\omega \tau_{12} \sqrt{1-v}) + \sum_{k=1}^N e^{-\sigma \tau_{13}} \sin(\omega \tau_{13} \sqrt{1-v}) + \sum_{k=1}^N e^{-\sigma \tau_{14}} \sin(\omega \tau_{14} \sqrt{1-v}) \right],$$

$$\text{де } \tau_{11} = t + kT - \frac{T}{2}; \tau_{12} = t + kT - \frac{T}{4}; \tau_{13} = t + kT - T; \tau_{14} = t + kT - \frac{3 \cdot T}{4}; N = \frac{6}{\sigma \cdot T}.$$

Вільна складова в інших чвертях періода визначаються так само, але аргументи синуса будуть мати інші значення:

для другої чверті періода

$$\tau_{21} = t + kT - \frac{5 \cdot T}{4}; \tau_{22} = t + kT - \frac{T}{2}; \tau_{23} = t + kT - T; \tau_{24} = t + kT - \frac{3 \cdot T}{4};$$

для третьої чверті періода

$$\tau_{31} = t + kT - \frac{3 \cdot T}{2}; \tau_{32} = t + kT - \frac{5 \cdot T}{4}; \tau_{33} = t + kT - T; \tau_{34} = t + kT - \frac{3 \cdot T}{4};$$

для четвертої чверті періода

$$\tau_{41} = t + kT - \frac{3 \cdot T}{2}; \tau_{42} = t + kT - \frac{5 \cdot T}{4}; \tau_{43} = t + kT - \frac{7 \cdot T}{4}; \tau_{44} = t + kT - T.$$

Для розрахунку напруги сигналу на виході синхронного детектора екстремального регулятора інтеграл необхідно подати у вигляді суми інтегралів для кожної чверті періоду пошукових коливань. В результаті отримаємо:

$$U_C(v) = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} |u_{30}(t)_{\text{пр1}} - u_{30}(t)_{\text{св1}}| \cdot dt + \frac{4}{T} \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{2}} |u_{30}(t)_{\text{пр1}} + u_{30}(t)_{\text{св2}}| \cdot dt - \frac{4}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{3T}{4}} |u_{30}(t)_{\text{пр3}} + u_{30}(t)_{\text{св3}}| \cdot dt - \frac{4}{T} \int_{\frac{3T}{4}}^T |u_{30}(t)_{\text{пр1}} - u_{30}(t)_{\text{св4}}| \cdot dt.$$

Знак “-” перед вільними складовими визначає додатний кидок примусової складової на початку першої і наприкінці четвертої чвертей періода а знак “+” – від’ємним кидком примусової складової наприкінці першої і на початку третьої чвертей періода. Число  $N$  визначається так же, як і у першому випадку.

Розрахунок статичних характеристик екстремальної системи регулювання при різних параметрах мережі і регулятора виконувався на ЕОМ за допомогою додатка Mathcad. Результати розрахунку при  $C=3$  мкФ,  $\Delta C=0,5$  мкФ,  $\Delta v=0,01$ ,  $U_{\phi}=5,774$  кВ і активному опорі реактора 4 Ом показані на рис. 3. Для кожного значення

добротності  $d$  і ступеня настроювання реактора  $\nu$  індуктивного дугогасного реактора і опір ізоляції мережі розраховувався за співвідношеннями:

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot 3C \cdot (1-\nu)} \quad R = \frac{L}{d \cdot \omega \cdot 3C \cdot L - r \cdot 3C}$$

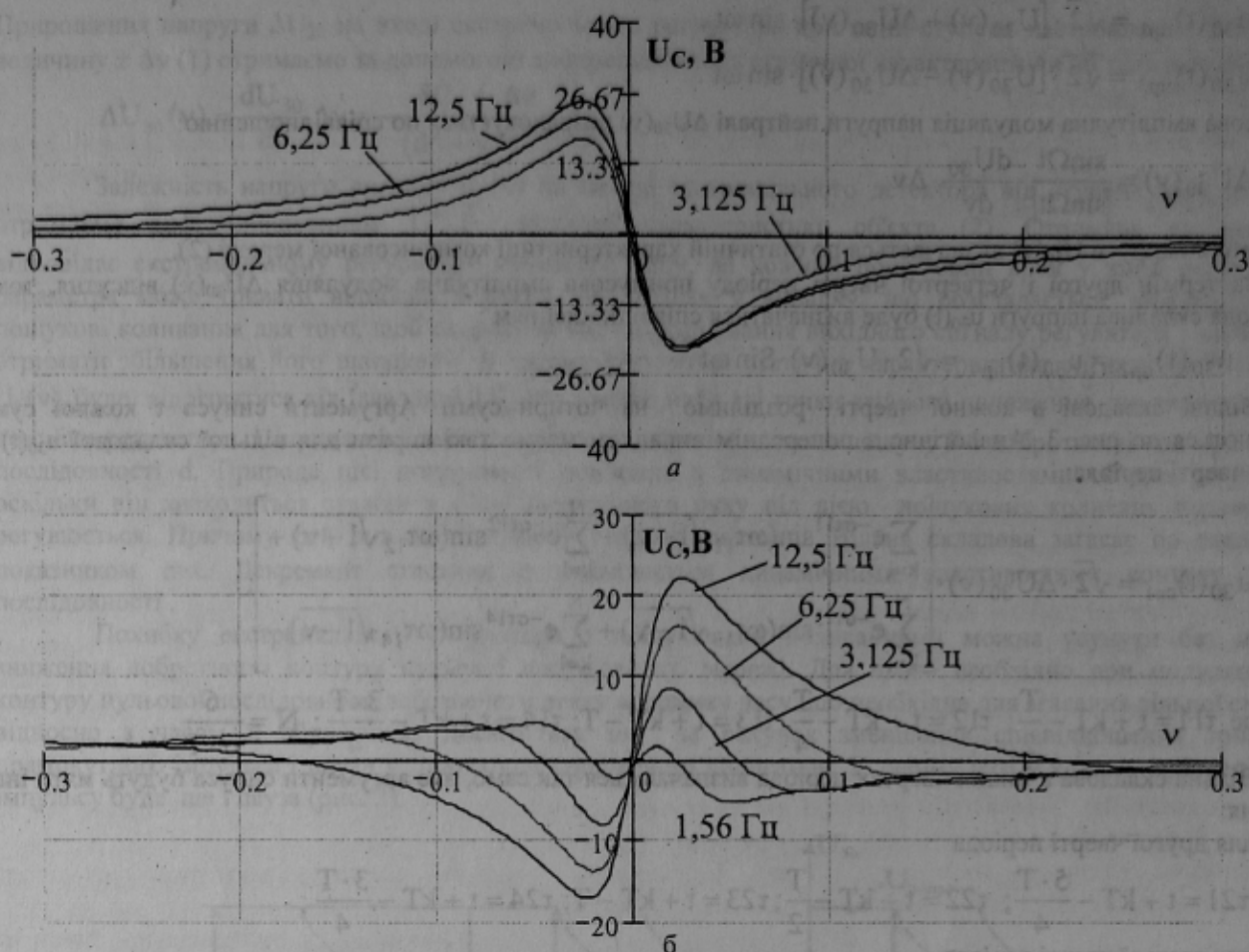


Рис. 3 Сигнал на виході детектора при  $d=0.025$  і різних частотах пошукових коливань:  
а – нова форма імпульса, б – стара форма імпульса.

З порівняння кривих на рис. 3 випливає, що зона похибки на частотах 3,125 Гц, 6,25 Гц, 12,5 Гц при новому імпульсі відсутня.

**Висновки.** Отримано співвідношення для розрахунку напруги сигналу на виході синхронного детектора екстремального регулятора у вигляді суми інтегралів для кожної чверті періоду пошукових коливань.

Аналіз результатів розрахунку на ЕОМ екстремального регулятора з впливом, що модулює, при якому у кожному півперіоді пошукових коливань є пауза тривалістю у чверть періода дозволяє усунути похибку визначення ступеня настроювання дугогасного реактора при достатньо високій частоті пошуку без зменшення добротності контура нульової послідовності мережі напругою 6, 10 кВ.

#### ЛІТЕРАТУРА

1 Сирота И.М., Кисленко С.Н., Михайлов А.М. Режимы нейтрали электрических сетей.–К.: Наук. думка, 1985.–264с.

2 Кобазев В.П., Кошин Б.А., Бакуновская Н.В. Влияние на работу фазового регулятора активной и емкостной несимметрии сети // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика.– Донецк: ДонГТУ, 1999.–С. 241-244.

3 Кобазев В.П., Кошин Б.А., Мишлаков Д.А. Анализ на ЭВМ экстремального регулятора // Вісник Східноукраїнського національного університету №3(37), Науковий журнал, 2001.– С. 193-197.

Рекомендована до друку проф., д.т.н. Сивокобиленко В.Ф.