

## АНАЛИЗ ФАЗОВОПОВОРОТНЫХ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА

Кобазев В.П., Иванова Л.И.

Донецкий национальный технический университет  
c12@elf.dgtu.donetsk.ua

The article is dealt with the regulator of the arc-quenching reactor grounded on a phase principle. The phase-shifting schemes being used in such regulators for making a dead zone or for correcting a phase as well as for forming the test signals are considered. The analytical relations for their calculation are given. The analysis of the phase-shifting scheme parameters on their performance characteristics is carried out.

Преобладающим видом повреждения в электрических сетях напряжением 6-35 кВ являются однофазные замыкания на землю (ОЗНЗ), составляющие около 75% общего числа повреждений. Большинство таких замыканий имеет дуговой характер. Перенапряжения, тепловые воздействия заземляющих дуг приводили к развитию ОЗНЗ в междуфазные и многоместные короткие замыкания.

Эффективным средством предотвращения аварийных последствий ОЗНЗ является компенсация емкостного тока сети при помощи дугогасящих реакторов (ДР). Для непрерывного поддержания резонансной настройки реактора в настоящее время чаще всего используется автоматический регулятор (АР), работающий в нормальном режиме сети. В результате обобщения опыта эксплуатации установлено, что при такой настройке ДР обеспечивается гашение заземляющих дуг более чем 80% случаев замыканий на землю.

На рис.1 приведена структурная схема фазового регулятора в котором информационным параметром о степени расстройки компенсации является угол между напряжением нейтрали  $U_{30}$  и опорным напряжением  $U_{оп}$  [1].

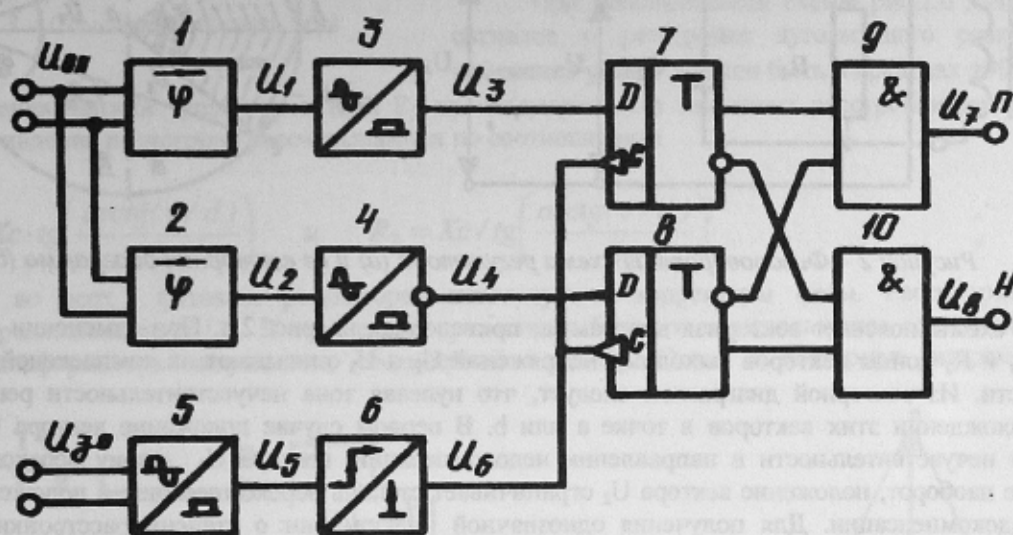


Рисунок 1 – Структурная схема автоматического регулятора дугогасящего реактора

Опорное напряжение  $U_{оп}$  поступает на два фазосдвигающих блока 1 и 2. Изменение фазы напряжения  $U_{оп}$  в сторону отставания или в сторону опережения позволяет получить необходимую зону нечувствительности по условию отсутствия автоколебаний привода дугогасящего реактора. Напряжения  $u_1$  и  $u_2$  с выхода блоков 1 и 2 поступают соответственно на блоки 3 и 4 где преобразуются в прямоугольные импульсы положительной полярности  $u_1$  и  $u_2$ . Длительность этих импульсов равна длительности полупериода  $U_{оп}$ . Сигналы с выхода преобразователей далее поступают на D – входы триггеров 7 и 8. Напряжение смещения нейтрали  $U_{30}$  может поступать на регулятор через корректор, который позволяет скомпенсировать фазовые погрешности измерительного трансформатора. При помощи блоков 5 и 6 напряжение  $U_{30}$  преобразуется также как и напряжение  $U_{оп}$  в прямоугольные импульсы. Блок 5 преобразует  $U_{30}$  в прямоугольные импульсы  $u_3$  длительностью полупериода  $U_{30}$ . Блок 6 по фронту  $u_3$  формирует короткие прямоугольные импульсы  $u_6$ . Эти импульсы поступают на динамические C – входы триггеров 7 и 8. Прямые и инверсные выходы триггеров подключены к логическим элементам 2И 9 и 10, на выходе которых формируются сигналы управления ДР П – перекомпенсация ( $u_7$ ) и Н – недокомпенсация ( $u_8$ ).

Регулятор работает следующим образом. При недокомпенсации  $U_{30}$  опережает по фазе опорное напряжение  $U_{оп}$ . Это приводит к тому, что тактирующий импульс  $u_6$  на C – входе триггера 8 совпадает во времени с прямоугольным импульсом  $u_4$  на D – входе этого же триггера. В результате триггер 8 переключается и на его прямом выходе устанавливается сигнал логической единицы. Триггер 7 останется в прежнем

состоянии, так как в момент появления тактирующего импульса на С – входе на его D – входе нулевой логический сигнал. При таком состоянии триггеров на выходе Н регулятора будет зафиксирован единичный сигнал, а на выходе П – нулевой.

По истечении некоторого времени, в результате работы привода дугогасящего реактора, тактирующий импульс  $u_6$  совпадает со случаем отсутствия единичного сигнала на D – входе триггера 8. Это состояние объекта регулирования соответствует его резонансной настройке. При этом триггер 8 возвратится в исходное положение и сигнал на его прямом выходе становится равным нулю. Дальнейшие изменения индуктивности реактора определяются его инерционностью. При ширине зоны нечувствительности больше инерционности реактора процесс регулирования заканчивается и его плунжер фиксируется в резонансном положении. Если инерционность будет больше зоны нечувствительности, то в системе возникают автоколебания привода

При возникновении перекомпенсации напряжение  $U_{30}$  отстает по фазе от опорного  $U_{0п}$ . В этом случае в схеме регулятора совпадают импульсы  $u_6$  и  $u_3$  на входах D – триггера 7. Поэтому он срабатывает, что приводит к появлению управляющего сигнала  $u_8$  на П – выходе регулятора. Включается привод и перемещает плунжер реактора в направлении уменьшения его индуктивности до тех пор пока не будет восстановлена резонансная настройка.

В рассмотренном регуляторе для задания зоны нечувствительности целесообразно использовать резисторно – конденсаторную мостовую фазоповоротную схему [2], приведенную на рис.2.

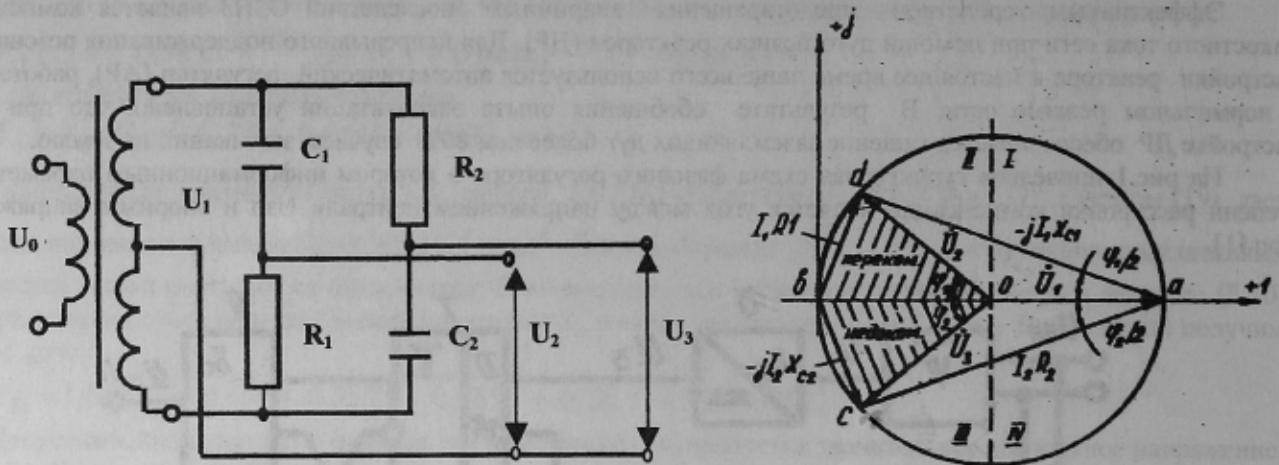


Рисунок 2 – Фазоповоротная схема регулятора (а) и ее векторная диаграмма (б)

Работу схемы поясняет векторная диаграмма, приведенная на рис. 2,а. При изменении сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  концы векторов выходных напряжений  $U_2$  и  $U_3$  описывают на комплексной плоскости две полуокружности. Из векторной диаграммы следует, что нулевая зона нечувствительности регулятора имеет место при нахождении этих векторов в точке а или б. В первом случае положение вектора  $U_2$  определяет ширину зоны нечувствительности в направлении недокомпенсации, вектора  $U_3$  – зону перекомпенсации. Во втором случае наоборот, положение вектора  $U_2$  ограничивает степень перекомпенсации, а положение вектора  $U_3$  – степень недокомпенсации. Для получения однозначной информации о степени расстройки дугогасящего реактора на выходе регулятора необходимо использовать только один из приведенных случаев. Выбор рабочей области диаграммы (рис.2,а) выполняется путем ограничения диапазона регулирования сопротивления резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . При реализации схемы обычно емкость конденсаторов не изменяется и принимается одинаковыми. Если для реализации принят второй случай, то сопротивление резистора  $R_1$  должно изменяться от нуля до величины равной сопротивлению конденсатора, а сопротивление резистора от некоторого максимального значения до минимального значения, равного сопротивлению конденсатора. В практической схеме регулятора синусоидальные напряжения  $u_2$  и  $u_3$  с выхода фазоповоротной схемы (рис. 3,б) подается на преобразователей, выполненных на операционных усилителях с большим входным сопротивлением. Выходные напряжения схемы при холостом ходе определяются соотношениями

$$U_2 = \frac{U_1}{2} \cdot \frac{R_1 + jX_{c1}}{R_1 - jX_{c1}} = \frac{U_1}{2} \cdot e^{-j2\varphi_1}, \quad U_3 = \frac{U_1}{2} \cdot \frac{R_2 - jX_{c2}}{R_2 + jX_{c2}} = \frac{U_1}{2} \cdot e^{-j2\varphi_2}$$

$$\text{где } \varphi_1 = \arctg \frac{R_1}{X_{c1}} \text{ и } \varphi_2 = \arctg \frac{X_{c2}}{R_2}.$$

Фазовый автоматический регулятор определяет расстройку дугогасящего реактора по величине угла  $\varphi$  между напряжениями смещения нейтрали и опорным. Этот угол от степени расстройки компенсации  $\nu$  определяется следующим соотношением :



$$\varphi = \arctg \frac{v}{d} \quad \text{или} \quad v = \operatorname{tg} \varphi \cdot d,$$

где  $d$  – коэффициент успокоения компенсированной сети, обусловленный активными потерями в изоляции сети и реакторе.

Для обеспечения устойчивости системы автоматического регулирования дутогасящим реактором должна устанавливаться  $\pm 0,02$  при значениях добротности сети изменяющейся от 0,03 до 0,1. Для оценки диапазона изменения  $\varphi$  при различных условиях используем семейство кривых  $v = f(\varphi)$  при различных значениях  $d$ , которые приведены на рис. 3. Из рис.3 следует, что при  $v=0,02$  минимальное значение угла  $\varphi=11,3^\circ$  будет при  $d = 0,1$  и максимальное значение угла  $\varphi=33,7^\circ$  – при  $d=0,03$ .

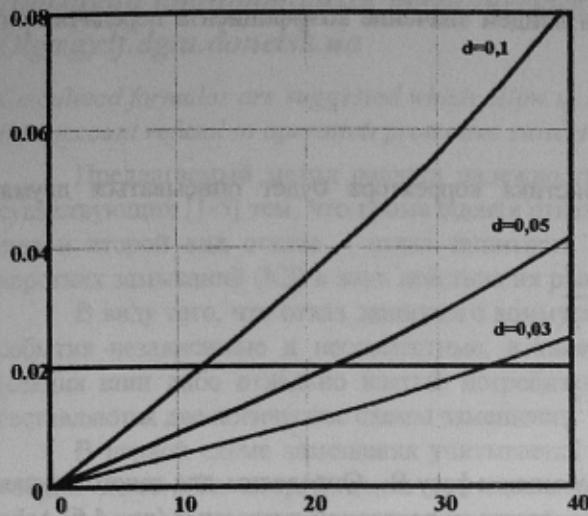


Рисунок 3 – Семейство кривых  $v(\varphi)$

Примем емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  одинаковыми и равными 0,5 мкФ, тогда его сопротивление окажется равным 6366 Ом. Для расчета сопротивлений резисторов фазоворотной схемы примем случай установки зоны нечувствительности показанный на рис.2. Будем считать, что сопротивления резисторов изменяются дискретно при помощи переключателя. Тогда для первого положения переключателя имеем:

$$R1 = X_c \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = 6366 \cdot 0,099 = 630 \text{ Ом}$$

$$R2 = \frac{X_c}{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \frac{6366}{0,099} = 64347 \text{ Ом}$$

Для  $\varphi=33,7^\circ$  значения сопротивлений резисторов следующие  $R1=1928 \text{ Ом}$  и  $R2=21019 \text{ Ом}$ .

При использовании схемы рис.2,б для формирования сигналов о расстройке дутогасящего реактора диапазон изменения угла  $\varphi$  должен быть в пределах  $\pm 90^\circ$  и разметка на

лимбе положения движка резисторов  $R_1$  и  $R_2$  проградуирована в значениях расстройки реактора  $v$ . В этом случае сопротивление резисторов рассчитываются по соотношениям

$$R_1 = X_c \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\arctg(v/d)}{2} \right) \quad \text{и} \quad R_2 = X_c / \operatorname{tg} \left( \frac{\arctg(v/d)}{2} \right)$$

Практически во всех фазовых регуляторах используются корректоры фазы. Рассмотрим особенности корректора предложенного в [3]. В этой схеме резистивный делитель используется совместно со вторичной обмоткой трансформатора напряжения, соединенной в звезду. Схема и векторная диаграмма корректора

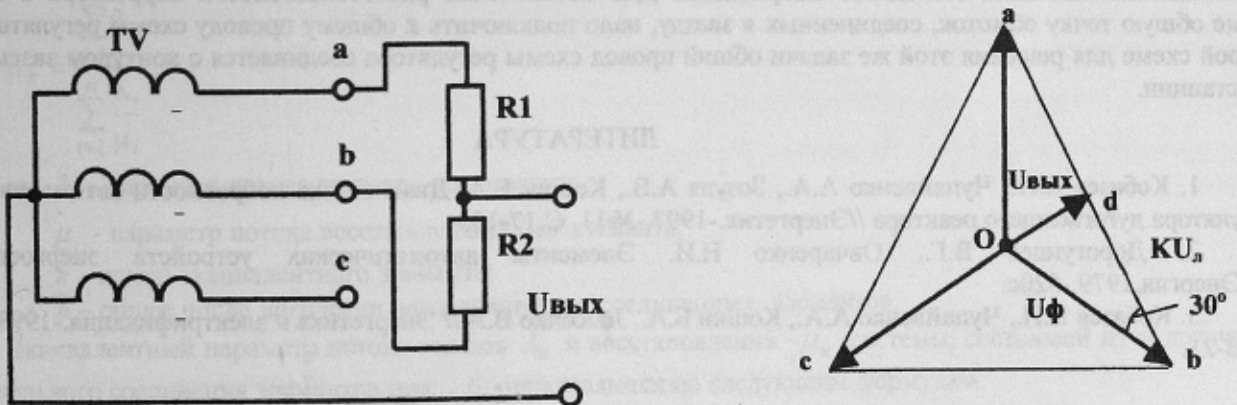


Рисунок 4 –Схема фазового корректора (а) и его векторная диаграмма (б)

показана на рис. 4.

На векторной диаграмме рассмотрим  $\triangle Obd$ . В треугольнике угол  $\varphi$  между напряжениями  $U_b$ ,  $U_{\text{вых}}$ , и выходное напряжение корректора  $U_{\text{вых}}$  зависят от коэффициента передачи делителя равного:  $K=R1/(R1+R2)$

В соответствии с теоремой косинусов из  $\triangle Obd$  выходной напряжение корректора определяется соотношением :

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{U_\varphi^2 + (K \cdot U_\varphi)^2 - 2 \cdot U_\varphi \cdot U_\varphi \cdot \cos 30^\circ}$$

С учетом  $U_\varphi = \sqrt{3} \cdot U_\varphi$  после преобразований получим следующее соотношение:

$$U_{\text{вых}} = U_{\phi} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot K^2 - K}.$$

Зависимость фазы  $u_{\text{вых}}$  от коэффициента  $K$  находится из того же треугольника по теореме синусов:

$\sin \varphi / K \cdot U_{\text{л}} = \sin 30^\circ / U_{\text{вых}}$ , откуда имеем соотношение:

$$\varphi = \arcsin \left( \frac{\sqrt{3} \cdot K}{2 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot K^2 - K}} \right).$$

Как следует из векторной диаграммы, угол  $\varphi$  может принимать значения в пределах от  $0^\circ$  до  $120^\circ$ . Поэтому для аналитического описания фазовой характеристики найдем значение коэффициента передачи при  $\varphi = 90^\circ$ . Для этого решим следующее уравнение:

$$1 = \frac{\sqrt{3} \cdot K}{2 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot K^2 - K}}, \text{ откуда получим } K = \frac{2}{3}.$$

С учетом полученного значения  $K$  фазовая характеристика корректора будет описываться двумя соотношениями:

$$\varphi(K) = \begin{cases} \arcsin \left( \frac{\sqrt{3} \cdot K}{2 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot K^2 - K}} \right), & \text{если } K \leq \frac{2}{3} \\ 90^\circ + \arcsin \left( \frac{\sqrt{3} \cdot K}{2 \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot K^2 - K}} \right), & \text{если } K > \frac{2}{3} \end{cases}$$

В измерительных трансформаторах напряжения часто заземляют фазу В. Определим для такого случая амплитудно-фазовую характеристику корректора. Для этого рассмотрим на векторной диаграмме (рис.4,б)  $\Delta abc$ . При таком варианте заземления обмотки изменяются диапазоны изменения значений выходного напряжения и фазы корректора. В таком случае максимальное выходное напряжение будет равно линейному напряжению. По аналогии с предыдущими соотношениями можно записать:

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{U_{\text{л}}^2 + (K \cdot U_{\text{л}})^2 - 2 \cdot U_{\text{л}} \cdot K \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos 60^\circ}, \text{ откуда } U_{\text{вых}} = U_{\text{л}} \cdot \sqrt{1 + K^2 - K}.$$

Применяя теорему синусов для  $\Delta abc$ , определим следующее соотношение:

$$\sin \varphi = \frac{K \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}}{2 \cdot U_{\text{вых}}}, \text{ откуда получим фазовую характеристику: } \varphi = \arcsin \left( \frac{K \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot \sqrt{1 + K^2 - K}} \right)$$

Анализ двух вариантов подключения делителя ко вторичной обмотке трансформатора напряжения показал, что первая схема имеет в два раза больший диапазон изменения угла  $\varphi$  при меньшем в  $\sqrt{3}$  раз максимальном значении выходного напряжения. Для обеспечения работоспособности корректора в первой схеме общую точку обмоток, соединенных в звезду, надо подключить к общему проводу схемы регулятора. Во второй схеме для решения этой же задачи общий провод схемы регулятора соединяется с контуром заземления подстанции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кобазев В.П., Чулайленко А.А., Зозуля А.В., Кошин Б.А. Диагностика исправности автоматического регулятора дугогасящего реактора // Энергетик.-1997.-№11, С.17-19.
2. Дорогунцев В.Г., Овчаренко Н.И. Элементы автоматических устройств энергосистем.- М.: Энергия, 1979.-520с.
3. Кобазев В.П., Чулайленко А.А., Кошин Б.А., Лысенко В.А. // Энергетика и электрификация.-1998.- №5, С.18-21.