

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АКТИВНЫХ ТРЁХПОЛЮСНИКОВ С СИНУСОИДАЛЬНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

Федоров М.М., Корощенко А.В., Кутковой И.П.
Донецкий национальный технический университет

E-mail koroschenko@donntu.edu.ua

The development of the arbitrary linear active three-pole network equivalent schemes is considered and proved. There are presented the calculation and experimental ways to determine the equivalent scheme parameters at star-connection with two and three emf sources as well as at delta-connection.

Замена активных трёхполюсников эквивалентными схемами в ряде случаев существенно упрощает расчёт и анализ процессов в разветвлённых электрических цепях. Ранее авторами на примере разветвлённых цепей постоянного тока были предложены схемы замещения активных трёхполюсников, соединённых звездой или треугольником [1]. Схемы содержали два или три источника напряжения. Была предложена методика определения параметров указанных схем замещения, основанная на расчётных или экспериментальных методах. Наличие синусоидальных источников питания в схемах активных трёхполюсников приводит к ряду особенностей, которые нужно учитывать при определении параметров схем замещения. Это – сдвиг фаз между ЭДС источников схемы замещения, а также учёт соотношений активных и реактивных сопротивлений в ветвях эквивалентных схем. Особый интерес представляют эквивалентные схемы замещения активных трёхполюсников с трёхфазным источником питания. В сложных трёхфазных системах имеют место различные несимметричные режимы, вызванные разными причинами (аварии, перекос фаз и т.д.). В результате их взаимное влияние на процессы в отдельных потребителях (трёхфазные электродвигатели, трансформаторы и т.п.) может оказаться существенным. Трёхфазный источник для отдельных потребителей может иметь значительные отклонения от симметрии как по величине фазных напряжений, так и внутренних сопротивлений фаз. Учёт влияния указанных отклонений удобно осуществлять с помощью эквивалентных схем замещения трёхфазных источников питания.

Целью предлагаемой работы являются обоснование и выбор эквивалентных схем замещения активного трёхполюсника А (рис. 1) с синусоидальными источниками, а также методы определения их параметров.

В общем случае эквивалентная схема замещения активного трёхполюсника может быть представлена трёхлучевой звездой и имеет вид рис. 2.

Как и в случае цепей постоянного тока эквивалентная схема содержит пять элементов: два источника синусоидальных ЭДС и три комплексных сопротивления, параметры которых необходимо определить. Эта задача может быть решена как расчётным путём, так и по экспериментальным данным.

Алгоритм определения параметров эквивалентной схемы следующий: ЭДС определяются по данным режима холостого хода, а сопротивления вычисляются через значения входных сопротивлений активного трёхполюсника.

При расчётном определении параметров по заданной схеме и её параметрам символическим методом находят напряжения холостого хода U_{xx31} и U_{xx23} , которым так же как и в случае активного трёхполюсника постоянного тока равны искомые ЭДС $E_1 = -U_{xx13}$ и $E_2 = U_{xx23}$. Для определения комплексных сопротивлений Z_1 , Z_2 , Z_3 используется схема соответствующего пассивного трёхполюсника, получаемого из активного путём замены источников питания их внутренними сопротивлениями. Далее известными методами определяют комплексные входные сопротивления пассивного трёхполюсника $Z_{вх12}$, $Z_{вх23}$, $Z_{вх31}$ относительно зажимов 1-2, 2-3 и 3-1, соответственно. Искомые сопротивления вычисляют по формулам:

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_{вх12} + Z_{вх31} - Z_{вх23});$$

$$Z_2 = \frac{1}{2}(Z_{вх12} + Z_{вх23} - Z_{вх31});$$

$$Z_3 = \frac{1}{2}(Z_{вх31} + Z_{вх23} - Z_{вх12}).$$

Определение параметров эквивалентных схем по результатам экспериментов рационально применять в случае сложных схем трёхполюсников, когда аналитические методы затруднены, а также в случае, если схема трёхполюсника неизвестна.

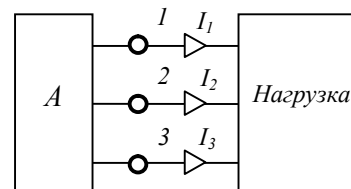


Рисунок 1 – Произвольная цепь с активным трёхполюсником

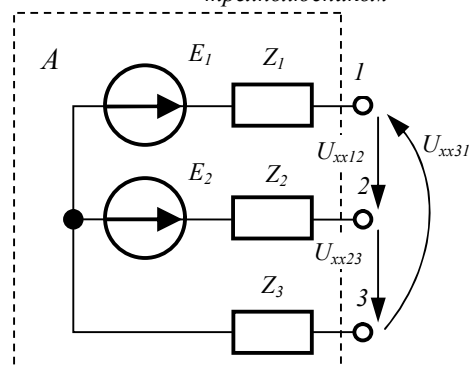


Рисунок 2 – Эквивалентная схема активного трёхполюсника при соединении «звездой» в режиме холостого хода

Определение действующих (или амплитудных) значений ЭДС источников осуществляется с помощью опытов холостого хода (рис. 2), когда с помощью вольтметров измеряются величины напряжений U_{xx12} , U_{xx23} , U_{xx31} . Для учёта угла сдвига фаз между ЭДС E_1 и E_2 необходимо воспользоваться топографической векторной диаграммой напряжений для режима холостого хода активного трёхполюсника. Согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме

$$\underline{U}_{xx12} + \underline{U}_{xx23} + \underline{U}_{xx31} = 0.$$

Векторная диаграмма напряжений представляет собой замкнутый треугольник, который строится по трём сторонам, и может иметь вид рис. 3а или 3б. В скобках заметим, что топографическая диаграмма обладает свойством, что направление напряжений относительно точек на диаграмме противоположно направлению этих напряжений относительно соответствующих точек на схеме. Для однозначного правильного выбора диаграммы рис. 3а или 3б можно

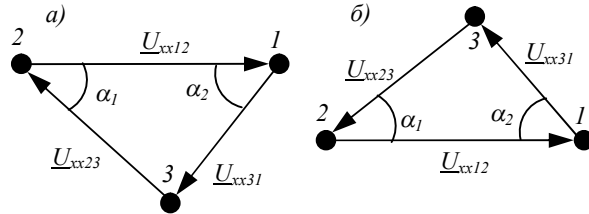


Рисунок 3 – Топографическая векторная диаграмма напряжений холостого хода активного трёхполюсника

использовать штатный индукционный фазоуказатель, который применяется в сетях с линейным напряжением до 660 В включительно. Диаграмма рис. 3а соответствует обратному порядку следования фаз (движение по стрелкам по часовой стрелке), а рис. 3б – прямому порядку следования фаз. Векторная диаграмма позволяет сформировать комплексы напряжений холостого хода. Начальную фазу одного из напряжений, например, \underline{U}_{xx12} , вектор которого направлен по горизонтали, принимаем равной нулю ($\psi_{U12}=0$). Измерив на векторной диаграмме углы α_1 и α_2 (рис. 3), записываем напряжения холостого хода в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \text{для рис. 3а} \quad & \underline{U}_{xx12} = U_{xx12}, & \text{для рис. 3б} \quad & \underline{U}_{xx12} = U_{xx12}, \\ & \underline{U}_{xx23} = U_{xx23} \cdot e^{j(180 - \alpha_1)}, & & \underline{U}_{xx23} = U_{xx23} \cdot e^{j(\alpha_1 - 180)}, \\ & \underline{U}_{xx31} = U_{xx31} \cdot e^{j(\alpha_2 - 180)}. & & \underline{U}_{xx31} = U_{xx31} \cdot e^{j(180 - \alpha_2)}. \end{aligned}$$

Эквивалентные ЭДС, таким образом, получены: $\underline{E}_1 = -U_{xx31}$, $\underline{E}_2 = U_{xx23}$.

Для определения первого входного комплексного сопротивления относительно выводов 1-2 Z_{ex12} выполняем два следующих измерения: 1) опыт короткого замыкания 1-2 с измерением тока I_{k12} . В результате получаем модуль сопротивления $Z_{ex12} = U_{xx12}/I_{k12}$; 2) опыт нагрузки трёхполюсника подключением известного ёмкостного сопротивления x с измерением тока I_{12}' . В результате получаем некоторое входное сопротивление $Z_{ex12}' = U_{xx12}/I_{12}'$. В итоге возникает следующая система уравнений

$$\begin{cases} Z_{ex12}^2 = r_{12}^2 + x_{12}^2; \\ (Z_{ex12}')^2 = r_{12}^2 + (x_{12} - x)^2. \end{cases}$$

Решая систему, находим сопротивления r_{12} и x_{12} :

$$x_{12} = 0,5x - 0,5 \frac{Z_{ex12}'^2 - Z_{ex12}^2}{x}; \quad r_{12} = \sqrt{Z_{ex12}^2 - x_{12}^2}.$$

Если знак сопротивления x_{12} окажется положительным, это означает индуктивный характер сопротивления, соответственно, в случае отрицательного знака получаем ёмкостное сопротивление x_{12} . Окончательно искомое комплексное сопротивление $Z_{ex12} = r_{12} + j \cdot x_{12}$.

Точно так же определяют входные сопротивления Z_{ex23} и Z_{ex31} .

Далее находят эквивалентные сопротивления так же, как и расчётным путем.

Если опыт короткого замыкания невозможен из-за слишком большого тока, производится опыт нагрузки на известное резистивное сопротивление R с последующим измерением тока нагрузки I_{n12} и вычислением модуля входного сопротивления $Z_{ex12} = U_{xx12}/I_{n12}$. Реактивное сопротивление вычисляется по той же самой формуле, а искомое резистивное $r_{12} = \sqrt{Z_{ex12}^2 - x_{12}^2} - R$.

Вывод. Предложенные способы получения эквивалентных схем замещения произвольного линейного активного трёхполюсника с синусоидальными источниками позволяют существенно расширить возможности расчёта и анализа трёхфазных цепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фёдоров М.М., Корощенко А.В., Михайлов В.Е. Эквивалентные схемы замещения активных трёхполюсников // Взрывозащищённое электрооборудование: сборник научных трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2011. С. 55-62.
2. М.П.Рибалко, В.О.Есауленко, В.І.Костенко. Теоретичні основи електротехніки: лінійні електричні кола: Підручник. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513с.