

цессов на экране монитора. Конкретное значение различий зависит от места замыканий в обмотке. Небольшое различие колебательных процессов при замыкании только одного витка связано с тем, что все три катушки трехфазного электродвигателя намотаны на одном магнитопроводе. Значительно лучшие результаты получаются, если сравнивать затухающие колебательные процессы в образцовой обмотке, расположенной на магнитопроводе одноимённого электродвигателя отдельно от испытываемой катушки.

Конденсаторы С7–С9, типа К78-2, должны иметь одинаковое значение емкости с точностью  $\leq 0,1\%$ , которые могут быть подобраны на электронном мосту, например, Е7-8. Это необходимо сделать для того, чтобы не было видно различий в изображениях на исправных обмотках ТАД.

Работа на установке осуществляется следующим образом. Включение установки осуществляется с помощью выключателя SA1.

С помощью ручек «Синхронизация» и «Частота» внешнего осциллографа, выполненного на базе компьютера, при подключенных трёх обмотках испытываемого ТАД и включенной установке, добиваются того, чтобы на экране монитора были видны три практически полных колебательных затухающих процессов в обмотках ТАД. Благодаря блоку синхронизации БС колебательные затухающие процессы в каждой катушке наблюдаются в виде разноцветных линий (например – красных, зеленых, синих). Эти три затухающих процесса можно накладывать друг на друга и анализировать различие по их амплитуде частоте и скорости затухания и, таким образом, можно оценить в которой из катушек имеются повреждения.

Схема установки выполнена на интегральных микросхемах серии КР140, КР142, К561 и КР1006, а механический переключатель заменен высоковольтными МОП транзисторами типа КП707А. Это позволило уменьшить размеры и вес корпуса устройства повысить надежность и получить более высокую производительность его работы.

Установка выполнена в виде приставки к виртуальному осциллографу.

УДК 621.3

## МЕТОД НОМОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

Корзо Д.А., Зайцева Т.А.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент АЛЕКСАНДРОВ О.И.

Целью данной работы является анализ аварийных режимов работы трехфазной сети посредством построения универсальных номограмм. В общем случае номограмма – это особый чертеж, с помощью которого можно, не производя вычислений, получать приближенное решение уравнений или приближенные значения функций. Основными аварийными режимами являются короткое замыкание (КЗ) и обрыв. Номограмма наглядно показывает состояние трехфазной сети в крайних и близких к ним режимах (резкое увеличение / уменьшение нагрузки).

Для построения номограмм необходимо выполнить следующие действия:

- 1) Найти напряжения на фазах нагрузки для крайних режимов (КЗ, обрыв).
- 2) Начертить диаграмму линейных и фазных напряжений генератора.
- 3) По выполненным расчетам в комплексной форме отложить от нулевой точки векторы напряжений.
- 4) Точки, соответствующие обрывам, следует соединить с двумя оставшимися фазами, но не с оборванной фазой, так как физической связи между ними нет. Поскольку при обрыве одной из фаз две оставшиеся фазы становятся соединенными последова-

тельно (по ним протекает один ток, и значение падения напряжения зависит только от сопротивления фаз потребителя), то отрезки на номограмме будут соотноситься между собой как нагрузки этих фаз.

5) Точки, обозначающие КЗ фаз, будут располагаться на концах векторов соответствующих фаз генератора, так как при КЗ любой фазы нулевая точка потребителя напрямую соединяется с фазой генератора, а напряжения на оставшихся фазах достигают линейных значений. Потенциал нулевой точки при этом смещается в точку, соответствующую КЗ.

6) Для наглядности на получившейся номограмме предварительно расчерчивается сетка. Для удобства за единицу принимают длину вектора напряжения фазы А генератора, вследствие чего каждой точке номограммы оказывается присвоена определенная координата, по которой можно проследить зависимость напряжения от величины нагрузки и соотношение между напряжениями.

Построение номограмм может оказаться весьма полезным при эксплуатации промышленного электрооборудования вследствие своей графической наглядности и простоты (не требуется производить никаких громоздких вычислений, так как все крайние режимы уже отображены на ней).

Для всестороннего анализа аварийных режимов трехфазной четырехпроводной промышленной сети было исследовано техническое состояние потребителей при несимметричной нагрузке в осветительной и силовой сети.

При несимметричной нагрузке в нейтральном проводе появляется значительный ток, что может привести к аварийным ситуациям, при которых нейтральный провод может оказаться оборванным. В этом случае нулевая точка потребителя смещается по отношению к нейтральной точке источника (сети) и фактические напряжения на зажимах фаз потребителя при сохранении симметрии напряжений сети становятся несимметричными. При этом в осветительной сети лампы двух фаз светят слабо, а в третьей фазе – ярко. В этой фазе, следовательно, электролампы быстро выходят из строя, так как превышение величины напряжения сверх номинальной даже на 10 % сокращает срок их службы более чем на 92 %.

Расчет аварийных режимов заканчивается построением диагностического треугольника, из которого можно видеть, что одна из фаз по техническому состоянию близка к обрыву. На этом треугольнике (номограмме) отмечены координаты нулевой точки потребителя и относительные сопротивления фаз в аварийном режиме.

При коротком замыкании, например фазы А, линейный провод непосредственно соединяется с нейтральной точкой приемника энергии, и потенциал точки О становится равным потенциалу точки А. Поэтому напряжение на этой фазе уменьшается до нуля, а на фазах В и С увеличивается до линейных напряжений. Таким образом, напряжения фаз В и С соответственно равны  $U_{AB}$  и  $U_{CA}$ .

При обрыве фазы А, фазы В и С оказываются соединенными последовательно и подключенными на линейное напряжение, вследствие чего по ним проходит ток возрастающей величины. Падение напряжения в данной цепи оказывается пропорциональным нагрузкам на фазах, что иллюстрирует номограмма: длина отрезка  $BD$  в 10 раз меньше длины отрезка  $CD$ , что согласуется с сопоставлением сопротивлений фаз:

$$\frac{R_C}{R_B} = \frac{100}{10}, \text{ и не противоречит закону Ома для участка цепи.}$$

При обрыве фазы С точка F оказывается равноудаленной от точек А и В, что объясняется одинаковым сопротивлением этих фаз.

Если сопротивление фазы увеличивается, то режим системы стремится к обрыву соответствующей фазы и создается опасность аварийной ситуации. При уменьшении

сопротивления фазы, проводимость возрастает, что может привести к короткому замыканию.

При силовой несимметричной нагрузке обрыв нейтрального провода приводит к увеличению напряжения на фазе  $A$  нагрузки в 2 раза, на фазе  $B$  в 1,5 раза. Активная мощность потребителя возрастает на 9,5 %, что объясняется перераспределением напряжения на зажимах фаз электроустановки.

При обрыве одной из фаз трехпроводной сети, напряжение на двух оставшихся распределяется таким образом: на одной фазе резко увеличивается, а на другой значительно уменьшается (в зависимости от значения сопротивлений фаз).

Короткое замыкание любой фазы выводит две оставшиеся на линейные напряжения, то есть увеличивает в  $\sqrt{3}$  раз.

В номограмме хорошо видны крайние режимы трехфазной цепи.

Например, при коротком замыкании фазы  $A$  потенциал точки  $O$  становится равным потенциалу точки  $A$ , то есть линейный провод  $A$  непосредственно соединяется с нейтральной точкой приемника энергии. Поэтому напряжение на первой фазе приемника уменьшается до нуля, а на второй и третьей – увеличивается до линейных напряжений. Таким образом, напряжение фаз  $B$  и  $C$  соответственно равны  $U_{AB}$  и  $U_{CA}$ .

При обрыве фазы  $A$  потенциал точки  $O$  смещается в точку  $D$ , а так как нагрузка является несимметричной, точка  $D$  располагается за линией  $BC$  и смещена в сторону потенциала точки  $C$ .

При обрыве одной из фаз трехпроводной системы на двух оставшихся фазах нагрузка оказывается соединенной последовательно. В результате чего, нагрузки фаз попадают под воздействие линейных напряжений. Следовательно напряжение на фазах  $B$  и  $C$  равны соответственно  $U_{BD}$  и  $U_{DC}$ .

При достаточно большом увеличении сопротивления фазы, режим системы стремится к обрыву соответствующей фазы и создается опасность возникновения аварийной ситуации. Критическая область лежит вблизи точек номограммы, соответствующих коротким замыканиям фаз.

Аналогичные рассуждения применимы к фазе  $B$  и  $C$ .

УДК 621.311

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА БУХБЕРГЕРА

*Рукавицин И.А.*

Научный руководитель – УСТИМОВИЧ В.А.

В сложившейся практике расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) уравнения, описывающие режим, составляются по методу узловых потенциалов в форме баланса мощностей [1]:

$$\text{diag}[\mathbf{U}][\hat{\mathbf{Y}}][\hat{\mathbf{U}}] = [\mathbf{S}], \quad (1)$$

где  $\text{diag}[\mathbf{U}]$  – диагональная матрица напряжений в узлах;

$[\hat{\mathbf{Y}}]$  – сопряженная матрица узловых проводимостей;

$[\hat{\mathbf{U}}]$  – вектор-столбец сопряженных напряжений в узлах;

$[\mathbf{S}]$  – вектор-столбец узловых мощностей.