**Методические указания к расчёту высших гармонических токов и напряжений в СЭС с использованием матричной алгебры**

Задание:

Определить коэффициенты искажения синусоидальности и гармонических составляющих напряжения на I и II секциях шин 10 кВ ГПП СЭС, изображённой на рисунке 1, а также на шинах высшего напряжения до и после прямого поэтапного (сначала к I – й секции шин 10 кВ, затем к II ­– й секции) подключения высоковольтных батарей конденсаторов (БК). Исходные данные приведены на рис. 1

Мощность высоковольтных батарей конденсаторов, подключаемых к I-й секции шин – 15,5 Мвар, ко второй секции – 5,5 Мвар.

Сделать выводы.

***Внимание!*** При подключении БК2 батарея конденсаторов БК1 остаются в работе.

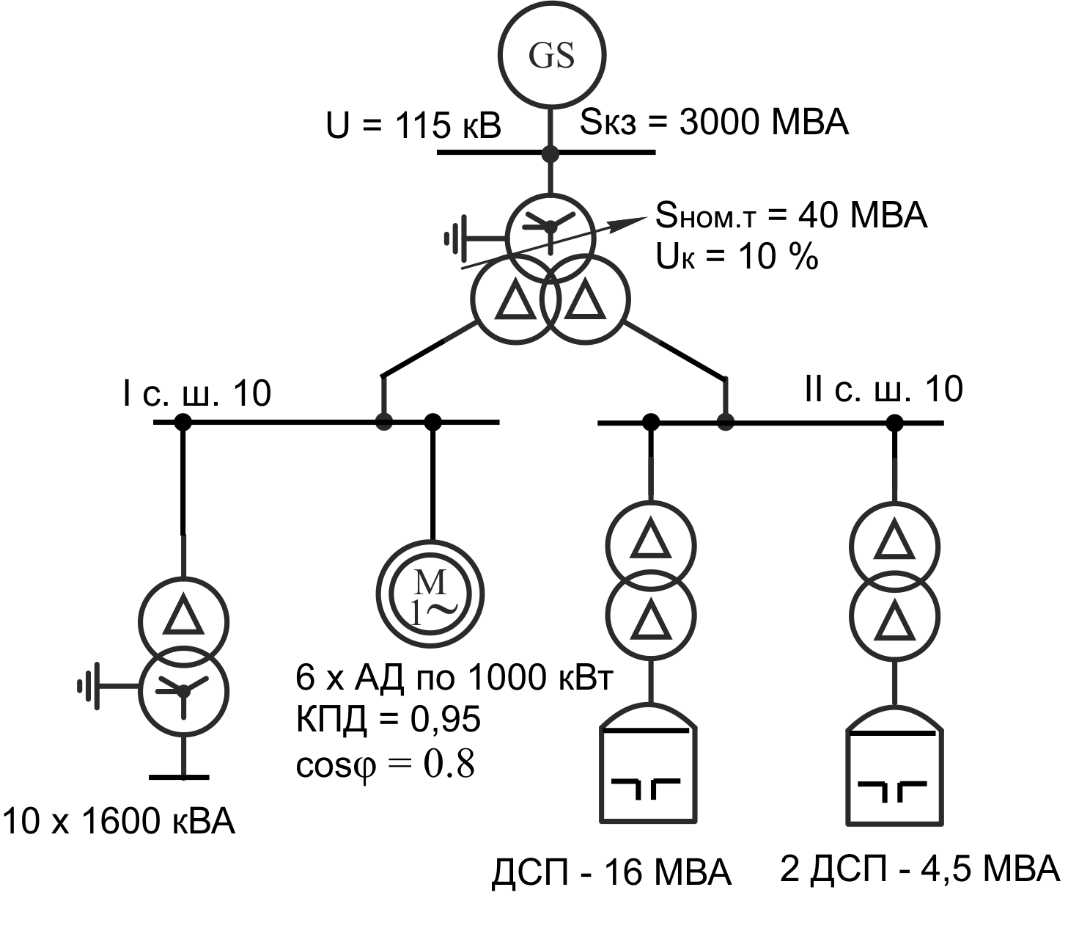


Рис. 1

Расчёты следует проводить в следующей последовательности:

**1.** Составляется схема замещения сети для расчёта гармонических составляющих токов и напряжений (Пример составления смотри в лекции № 12). Схема замещения для сети Рис.1 показан на Рис.2.

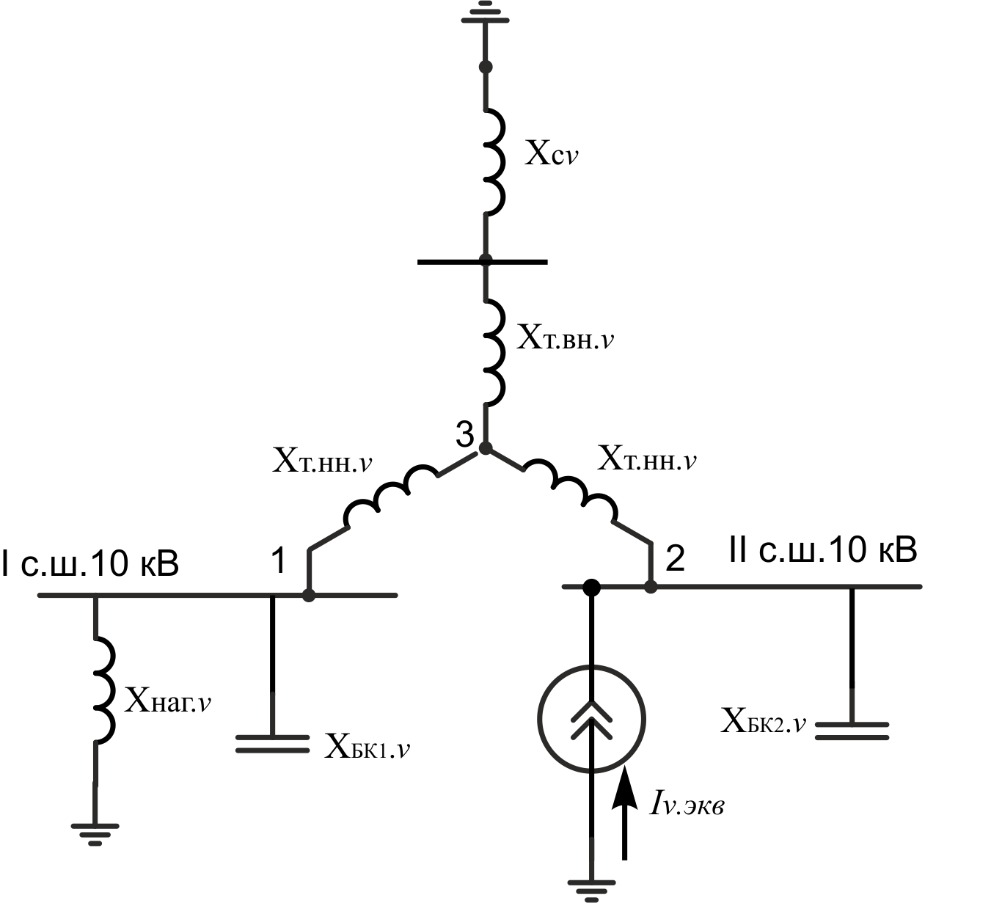


Рис. 2. Схема замещения.

**2.** Определяются параметры схемы замещения. В результате получаем линейную электрическую сеть с заданными параметрами.

**В качестве методической помощи запишем расчётные формулы для определения параметров схемы замещения:**

Сопротивление системы для ν – й гармоники

 = 0,65\*10,5^2/3000 ν = 0.0239\*ν = 0.024\*ν;

Сопротивление обмоток высшего и низшего напряжения трансформатора для ν – й гармоники

 = 0,125(10/100) \*(10,5^2/40) \*ν = 0,0345\*ν

 = 1.75\*(10/100) \*(10,5^2/40) \*ν = 0,482\*ν

Эквивалентное сопротивление нагрузки, подключённой к первой секции шин 10 кВ для ν – й гармоники

 = (34/(10\*1,6 + 2\*6/0,95/0,8)) \* ν = 1,07 \* ν,

где  – сумма номинальных мощностей трансформаторов, подключённых к первой секции шин, МВА; – сумма номинальных мощностей электродвигателей, подключённых к секции шин, МВА.

Сопротивление конденсаторных батарей для ν – й гармоники, подключаемых:

– к 1-й секции шин 10 кВ

 = (10,5^2 / 15,5) / ν = 7,11 / ν;

– к 2-й секции шин 10 кВ

= (10,5^2 / 5,5) / ν = 20,05 / ν

Эквивалентный ток ν – й гармоники, генерируемый ДСП

 = 1230 / ν2,

где  – номинальная мощность самого крупного печного трансформатора, кВА; – номинальная мощность *i*-го печного трансформатора, кВА; *N*п.т – общее число дуговых сталеплавильных печей;  – напряжение сети, кВ.

*Если источниками высших гармоник являются полупроводниковые преобразователи, то генерируемые ими гармонические составляющие токов до гармоники № 13 включительно можно рассчитывать по приближённой формуле*

.

При этом следует иметь ввиду, что полупроводниковые преобразователи генерируют в сеть гармоники канонического ряда

,

где *m* – фазность преобразователя; *k* – может принимать значения 1, 2, 3, … .

**3.** **Рассчитываются гармонические** **составляющие напряжений** со 2-го по 10-й гармоники в узлах 1, 2 и 3 любым известным из теории линейных электрических цепей методом. Целесообразно использовать метод узловых потенциалов, очень удобный для расчётов в матричной форме с применением ЭВМ.

При составлении уравнений узловых потенциалов заземлённый узел принимаем за базисный. Тогда система уравнений узловых потенциалов в нашем случае запишется в виде



Следует также иметь в виду, что в нашей схеме прямая связь между узлами 1 и 2 отсутствует. Поэтому взаимные проводимости между ними равняются нулю, т. е. . Собственные проводимости узлов 1, 2, и 3 соответственно ,  и определяются путём суммирования проводимостей ветвей, подключённых к соответствующим узлам.

В матричной форме вышеприведенная система уравнений принимает компактный вид

, (1)

где – матрица узловых проводимостей для ν – й гармоники; – вектор узловых потенциалов ν – й гармоники по отношению к базовому узлу; – вектор задающих токов.

Матрица узловых проводимостей обладает свойством симметричности относительно элементов главной диагонали и в нашем случае будет иметь вид

 (2)

В числовом выражении данная матрица принимает вид



И в более удобной форме



Вектора узловых потенциалов и задающих токов в нашем случае имеют вид

 ,  (3)

Для решения уравнения (1) в матричной форме левую и правую его части следует умножить на обращённую матрицу узловых проводимостей

.

Так как произведение обращённой матрицы на исходную даёт единичную матрицу, то последнее выражение принимает вид

 (4)

Как видно из выражения (4) для нахождения потенциалов узлов достаточно найти обращённую матрицу узловых проводимостей, алгоритм нахождения Вам известен:

1). Находим определитель исходной матрицы узловых проводимостей det, раскрывая его по элементам 1-й строки .



2). Транспонируем исходную матрицу. Как было уже отмечено выше матрица узловых проводимостей симметрична относительно элементов главной диагонали. Поэтому транспонированная матрица будет такой же, что и исходная, т.е. .

3). Формируем вспомогательную (союзную) матрицу , элементами которой являются алгебраические дополнения элементов транспонированной матрицы . Напоминаю, что под алгебраическим дополнением элемента матрицы, расположенного на пересечении её *i*-й строки и *j*-го столбца, понимается произведение вида (-1)(*I* + *j*) \**M*i,j, где *Mi,j* – минор этого элемента, получаемый путём вычёркивания в самой матрице *i*-й строки и *j*-го столбца.

Например, элемент союзной матрицы, расположенный на пересечении 1-го столбца и 1-й строки, являющийся алгебраическим дополнением соответствующего элемента транспонированной матрицы , определится путём вычёркивания 1-й строки и 1-го столбца указанной матрицы. Оставшаяся после этого часть матрицы (меньшего порядка) представляет собой минор *М*1,1 . С учётом сказанного значение искомого элемента союзной матрицы *l*1,1 для *v* – й гармоники найдём по выражению

Аналогичным образом определяются и остальные элементы союзной матрицы :















.

Ниже приведена полученная союзная матрица

. (5)

4). Находим обратную матрицу путём деления элементов вспомогательной (союзной) матрицы на определитель исходной матрицы

. (6)

Вынесем из матрицы постоянный множитель 1/v2, в результате чего получим

. (7)

**4. Задаваясь порядковым номером гармоники ν, генерируемой ДСП, по формуле (4) рассчитываем потенциалы узлов φν.**

 (8)

Найдём вектор – столбец потенциалов узлов второй гармоники относительно земли (базисного узла). При этом учтём, что согласно рекомендациям специальных работ, посвящённых исследованию гармонических составляющих, генерируемых ДСП, действующее значение тока 2-й гармоники равняется току 3-й гармоники. Поэтому составляющие (компоненты) вектора задающих токов делим на 32

 (9)

Потенциалы гармонических составляющих порядка *v* ≥ 3 рассчитаем по формуле (8), которая после внесения сомножителя *v* / 110,76 под знак матрицы принимает вид

 (10)

Поскольку потенциал базисного узла равняется нулю, то найденные потенциалы представляют собой гармонические составляющие напряжений узлов по отношению к земле, т. е. . Полученные результаты следует занести в таблицу 1.

Таблица 1

Гармонические составляющие напряжений, В

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер  узла | Номера гармоник | | | | | | | | | | |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |  |  |
| 1 | 10,63 | 15,94 | 11,96 | 9,56 | 7,97 | 6,83 | 5,98 |  |  |  |  |
| 2 | 147,16 | 220,73 | 165,6 | 132,4 | 110,4 | 94,6 | 82,8 | 73,6 | 66,2 |  |  |
| 3 | 15,41 | 23,32 | 17,34 | 13,87 | 11,56 | 9,9 | 8,57 | 7,71 | 6,94 |  |  |

***Внимание!* При определении напряжения второй гармоники задающий ток второй гармоники, генерируемых ДСП, принимается равным току третьей гармоники.**

**5.** **Рассчитываются коэффициенты всех гармонических составляющих напряжений** в указанных узлах . Полученные результаты следует занести в таблицу 2.

Таблица №2

Коэффициенты гармонических составляющих напряжений, %

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер  узла | Номера гармоник | | | | | | | | | | |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |  |  |
| 1 | 0,184 | 0,276 | 0,207 | 0,166 | 0,138 | 0,118 | 0,104 |  |  |  |  |
| 2 | 2,55 | 3,82 | 2,87 | 2,29 | 1,91 | 1,64 | 1,43 | 1,275 | 1,15 |  |  |
| 3 | 0,267 | 0,4 | 0,3 | 0,24 | 0,2 | 0,17 | 0,15 | 0,13 |  |  |  |

**6.** **Определяются в каждом из трёх узлов коэффициенты искажения синусоидальности напряжения**

. (11)

В результате получаем вектор-столбец



7. Проведём аналогичные расчёты при условии, когда к I-й секции шин 10 кВ ГПП подключены высоковольтные батареи конденсаторов.

При подключении к первой секции шин батареи конденсаторов изменяется только собственная проводимость узла 1. Поэтому матрица узловых проводимостей принимает вид

 (12)

В числовом выражении данная матрица будет иметь вид



Или в более удобной и компактной форме

. (13)

Далее проводятся расчёты подобные тем, которые приведены в предыдущих пунктах 3 – 6, выделенных жирным шрифтом

8. Провести аналогичные расчёты при условии, когда ко II-й секции шин 10 кВ ГПП подключили высоковольтные батареи конденсаторов, не отключая при этом батареи конденсаторов, подключённых к I-й секции шин 10 кВ. При этом матрица узловых проводимостей будет отличаться от матрицы (12) только собственной проводимостью узла 2 и будет иметь вид



В числовом выражении данная матрица после подстановки соответствующих сопротивлений и небольших вычислений будет иметь вид

.

Далее проводятся расчёты подобные тем, которые приведены в предыдущих пунктах

3 – 6, выделенных жирным шрифтом.

Отметим, что при решении задачи могут быть использованы программные продукты, позволяющие находить обратные матрицы.

При затруднении проведения расчётов с использованием матричной алгебры задача может быть решена путём сворачивания схемы замещения, целью которого является нахождение эквивалентного сопротивления схемы замещения относительно её узла 2, к которому подключен источник высших гармоник. Умножение найденного эквивалентного сопротивления на величину эквивалентного тока *v*-й  позволяет найти потенциал *v*-й гармоники узла 2 относительно земли. После этого разворачивая схему в обратном направлении используя закон Ома найти потенциалы узлов 3 и 1.