

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1.018.3

Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л.

УЧЕТ НАГРУЗОК В РАСЧЕТАХ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Расчет высших гармоник, анализ несинусоидальных режимов систем электроснабжения невозможен без корректного задания параметров электрических сетей и, в частности, электрических нагрузок. Известно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) нагрузки оказывает существенное влияние на АЧХ входных и взаимных сопротивлений узлов электрических сетей, распределение резонансных частот. Не менее важным является корректный учет активных сопротивлений, определяющих значения токов и напряжений высших гармоник (ВГ) на резонансных частотах, скорость затухания переходных процессов, потери энергии.

Рассмотрим схемы замещения различных нагрузок систем электроснабжения и методы их учета в расчетах несинусоидальных режимов электрических сетей.

Синхронных двигатели. Синхронные двигатели представляются схемами замещения для ВГ по продольной (Рис. 1, а) и поперечной (Рис. 1, б) осям с учетом трансформаторного взаимодействия между цепями статора и ротора. На этих схемах для ν -й гармоники $X_{l\nu}$, $X_{f\nu}$ - индуктивные сопротивления рассеяния соответственно обмотки статора и обмотки возбуждения; $X_{ad\nu}$, $X_{aq\nu}$ - сопротивления взаимной индукции между цепями ротора и статора соответственно по продольной и поперечной осям; $X_{kd\nu}$, $X_{kq\nu}$ - индуктивные сопротивления пусковых (демпферных) контуров соответственно по продольной и поперечной осям.

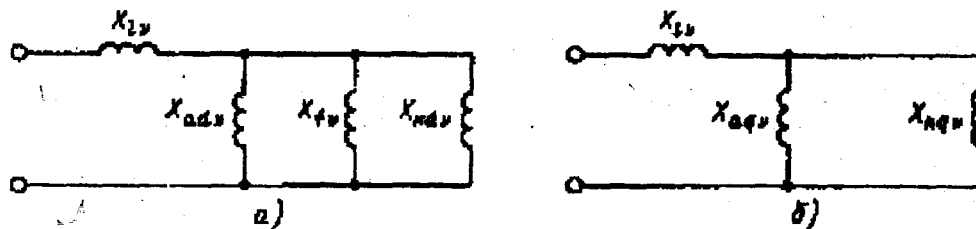


Рис. 1 - Схема замещения синхронного двигателя для высших гармоник

Для определения сопротивлений схем замещения параметры цепей ротора приводятся к частоте скольжения. Сопротивления взаимной индукции между статором и ротором по осям d и q для ν -й гармоники равны соответственно νX_{ad} и νX_{aq} . Сопротивление рассеяния обмотки статора для ν -й гармоники определяется как νX_l , где X_l - сопротивление рассеяния для 1-й гармоники.

Сопротивления обмотки возбуждения, успокоительных обмоток по продольной и поперечной осям для ν -й гармоники определяются соответственно как $X_{fv} \sqrt{\nu \pm 1}$; $X_{kd} \sqrt{\nu \pm 1}$;

$X_{kq} \sqrt{v \pm 1}$ при сильном проявлении поверхностного эффекта в цепях ротора. Относя эти сопротивления к частоте скольжения, получаем сопротивления роторных цепей

$$X_{fv} = X_f \frac{v}{\sqrt{v \pm 1}}; \quad (1)$$

$$X_{kdv} = X_{kd} \frac{v}{\sqrt{v \pm 1}}; \quad (2)$$

$$X_{kqv} = X_{kq} \frac{v}{\sqrt{v \pm 1}}. \quad (3)$$

Согласно схемам замещения на Рис. 1, а и б эквивалентные индуктивные сопротивления неявнополюсного синхронного двигателя для высших временных гармоник тока по осям d и q соответственно равны

$$X_{dv} = vX_1 + \frac{1}{\frac{1}{vX_{ad}} + \frac{1}{vX_f} + \frac{1}{vX_{kd}}}; \quad (4)$$

$$X_{qv} = vX_1 + \frac{1}{\frac{1}{vX_{ad}} + \frac{1}{vX_f} + \frac{1}{vX_{kd}}}. \quad (5)$$

Среднее значение этих сопротивлений

$$X_v = 0,5(X_{dv} + X_{qv}), \quad (6)$$

где $v = 2; 3; \dots; 19$.

Приведенные формулы аналогичны по структуре формулам для сопротивлений обратной последовательности X_2 , явнополюсных синхронных машин, которые даются в каталогах и формулярах; поэтому удобно представлять X_v виде

$$X_v = v k_{2v} X_2. \quad (7)$$

Для $v = 9; 11; 13$ в среднем оказывается $k_{2v} = 0,7$. Это совпадает с рекомендацией Р.А. Лютера для гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Для 5-й и 7-й гармоник обеих последовательностей в среднем $k_{2v} = 0,75$; для 3-й гармоники прямой последовательности в среднем $k_{2v} = 0,8$, обратной — $k_{2v} = 0,85$. При учете 15-й и гармоник более высоких порядков $k_{2v} \approx 0,65$; для $v = 3 + 19$ обеих последовательностей среднее значение коэффициента $k_{2v} \approx 0,75$.

При учете активных сопротивлений цепей статора и ротора при резком проявлении поверхностного эффекта полное сопротивление отличается от индуктивного не более чем на 2%. Угловая погрешность не превышает 10-12%, если не учитывать активное сопротивление. Поэтому практически учет активных сопротивлений для ВГ не требуется.

Индуктивное сопротивление для v -й гармоники для двигателя 1000 кВт, 6 кВ приближенно равно, Ом:

$$X_v = 6v; \quad (8)$$

для двигателя 1000 кВт, 10 кВ:

$$X_v = 17v. \quad (9)$$

По этим формулам можно приближенно оценить эквивалентное сопротивление двигателей других мощностей или групп электродвигателей. Более точно X_v рассчитывается по выра-

жению (7) при $k_{2v} = 0,75$.

Если сопротивление обратной последовательности задано в относительных единицах, то сопротивление электродвигателей для высших гармоник определяется по формуле

$$X_v = 0,75vX_2 \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}, \quad (10)$$

где $S_{ном}$ – номинальная мощность двигателя, МВ·А; $U_{ном}$ – номинальное напряжение, кВ.

В [3] приводится отличное значение коэффициента k_{2v} для синхронных электродвигателей. В случае явнополюсных машин $k_{2v} = 0,60 + 0,35/v$, неявнополюсных $k_{2v} = 0,75 + 0,40/v$.

Асинхронные двигатели. Асинхронные двигатели на частотах ВГ представляются схемами замещения, аналогичными трансформаторной схеме замещения при основной частоте. При синхронной частоте вращения, соответствующей v -й гармонике напряжений с частотой $v\omega$ и равной $vn_{синх}$, скольжение s_v при частоте вращения ротора n_p

$$s_v = \frac{vn_{синх} \pm n_p}{vn_{синх}}. \quad (11)$$

Знак минус берется в случае, когда v -я временная гармоника поля статора вращается в ту же сторону, что и ротор; знак плюс – при противоположном направлении вращения. Частота вращения ротора связана со скольжением соотношением

$$n_p = (1-s) n_{синх}; \quad (12)$$

скольжение для v -й гармоники

$$(13)$$

При работе асинхронных двигателей обычно $s \approx 0,05$, поэтому $s_v \approx 1 \pm 1/v$.

Схема замещения трехфазного асинхронного двигателя для v -й гармоники представлена на Рис. 2. Приближенно можно считать, что при наличии в токе статора ВГ асинхронный двигатель по отношению к ним находится в режиме короткого замыкания, так как скольжения на частотах гармоник $v \geq 3$ находятся в пределах 0,67 - 1,33; среднее значение скольжения $s_v = 1$. Обычно сопротивление ветви намагничивания в десятки раз больше соответствующих сопротивлений статора и ротора, поэтому в схеме замещения для высших гармоник его можно не учитывать.

Полагая, что имеет место резкое проявление поверхностного эффекта $R_{kv} = R_k \sqrt{v}$ полное сопротивление асинхронного двигателя для v -й гармоники

$$Z_v = \sqrt{R_{kv}^2 + X_{kv}^2} = \sqrt{v^2 X_k^2 + vR_k^2} \approx vX_k \approx vZ_k, \quad (14)$$

где R_k , X_k , Z_k – соответственно активное, реактивное и полное сопротивления короткого замыкания асинхронного двигателя.

Практически сопротивление асинхронных двигателей ВГ тока можно принимать чисто реактивным. Значение этого сопротивления с погрешностью до 7 % можно определять по формуле

$$X_v = vZ_k = \frac{vU_{ф.ном}}{k_{п} I_{ф.ном}}, \quad (15)$$

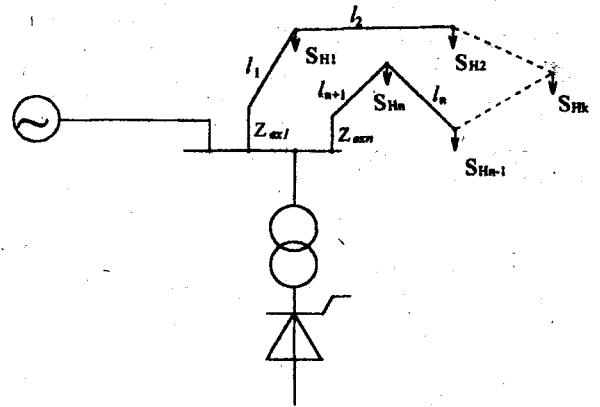
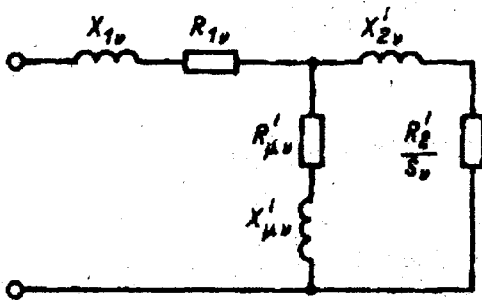


Рис. 2 - Схема замещения асинхронного двигателя для высших гармоник

где $U_{ф.ном}$, $I_{ф.ном}$ - номинальные фазные напряжения и ток электродвигателя;
 k_n - кратность пускового тока.

Для высоковольтных асинхронных двигателей кратность пускового тока в среднем равна 5,5; приближенно индуктивное сопротивление для ВГ (Ом) двигателя 1000 кВт, 6 кВ определяется в соответствии с (8), а для двигателя 1000 кВт, 10 кВ - в соответствии с (9).

Эти величины можно использовать при определении эквивалентного сопротивления парка асинхронных двигателей 6 - 10 кВ с единичными мощностями более 250 кВт. На промышленных предприятиях в настоящее время не эксплуатируются высоковольтные асинхронные двигатели с массивным ферромагнитным ротором, поэтому сопротивление их временным гармоникам тока здесь не рассматривается.

В отечественной и зарубежной практике применяются также выражения вида

$$X_v = vk_{av}Z_k.$$

По данным [3] значение коэффициента k_{av} принимаются равным $k_{av} = 0,69 + 0,3\sqrt{v}$ для двигателей с короткозамкнутым ротором и для двигателей с фазным ротором. Коэффициент k_{av} уменьшение индуктивности обмоток вследствие вытеснения тока в проводниках.

Амплитудно - частотные характеристики. АЧХ входных сопротивлений электрических сетей в звуковом диапазоне частот представляют собой сложные непериодические функции с чередующимися максимумами и минимумами. Распределение экстремумов АЧХ входного сопротивления сети, а следовательно и резонансных частот, зависит от целого ряда факторов: конфигурации электрической сети, длины линий электропередач, АЧХ нагрузок, наличия и размещения компенсирующих и фильтрокомпенсирующих устройств.

АЧХ входного сопротивления кольцевой электрической сети (Рис. 3) определяется следующим образом

$$Z_{\alpha}(v) = Z_c \frac{shyl_{\Sigma} + \frac{Z_c}{Z_{н3}(v)} shyl_{\Sigma n} \cdot shyl_{n+1}}{2(chyl_{\Sigma} - 1) + \frac{Z_c}{Z_{н3}(v)} shyl_{\Sigma}}, \quad (16)$$

где эквивалентное сопротивление нагрузки $Z_{н3}$ может быть получено последовательным переносом нагрузок Рис. 4 и Рис. 5

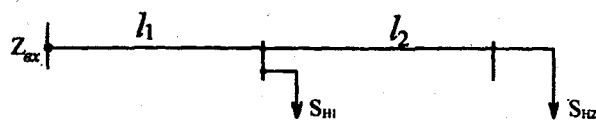


Рис. 4 - Исходная схема

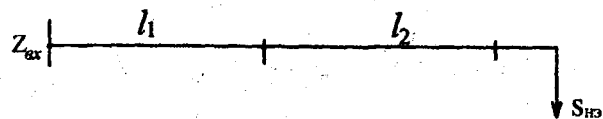


Рис. 5 - Эквивалентная схема

$$Z_{н3} = Z_c \operatorname{th} \left[\operatorname{arcth} \left[\operatorname{cth} \left(\gamma l_2 + \operatorname{arcth} \left(\frac{Z_{н2}}{Z_c} \right) \right) + \frac{Z_c}{Z_1} \right] - \gamma l_2 \right]. \quad (17)$$

Зависимость (17) имеет сложный характер и зависит как от АЧХ нагрузок, так и от числа и длины линий электропередач. На Рис. 6 представлена зависимость $X_{н3}(\nu)$ для схемы Рис. 3 при $l_1 = 100$ км, $l_2 = 240$ км, $l_3 = 80$ км, $l_4 = 30$ км, $l_5 = 60$ км, $l_6 = 120$ км, $l_7 = 30$ км, $X_{н1} = 1000$ Ом, $X_{н2} = 900$ Ом, $X_{н3} = 100$ Ом, $X_{н4} = 200$ Ом, $X_{н5} = 100$ Ом, $X_{н6} = 800$ Ом, $Z_c = 400$ Ом, $\beta = 10^{-3}$ км⁻¹.

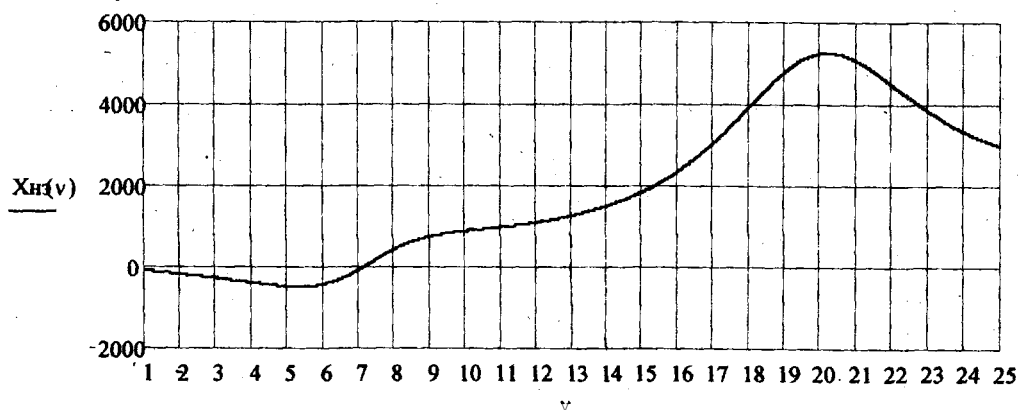


Рис. 6 - Эквивалентное сопротивление нагрузок

Эквивалентное сопротивление нагрузки оказывает существенное влияние на характер АЧХ входного сопротивления электрической сети. На рисунках Рис. 7 - Рис. 9 представлены зависимости входного реактивного сопротивления от номера гармоники соответственно для 4, 5 и 7 линий. Как видно из этих зависимостей число нулей и полюсов АЧХ входного сопротивления электрической сети неоднозначно зависит от числа и длины линий электропередач.

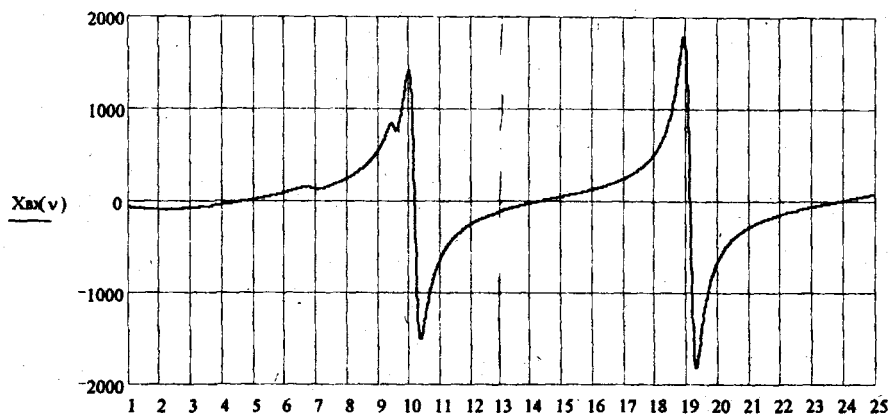


Рис. 7 - АЧХ кольцевой сети с 4-мя линиями

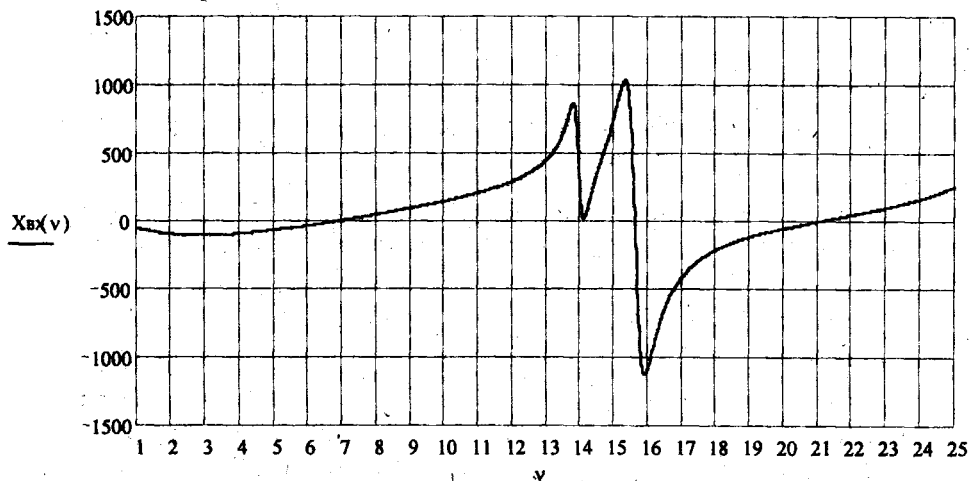


Рис. 8 - АЧХ кольцевой сети с 5-ю линиями

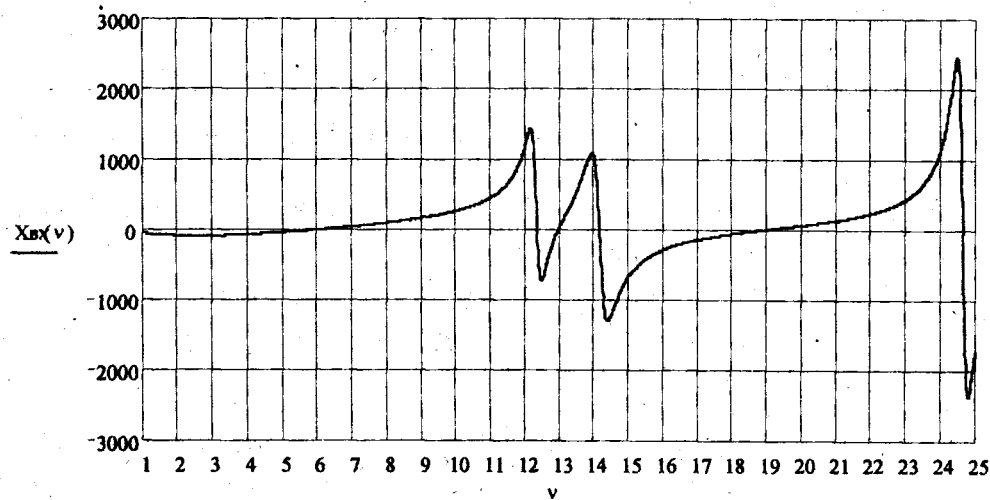


Рис. 9 - АЧХ кольцевой сети с 7-ю линиями

Для точного расчета АЧХ входного сопротивления электрической сети, а, следовательно, и для расчета несинусоидальных режимов необходим учет нагрузок. Следует также отметить, что при анализе резонансных режимов, расчете потерь энергии необходимо учитывать активные сопротивления элементов электрических сетей.

Перечень ссылок

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения. - М.: Энергоатомиздат, 1994.-272 с.
2. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Амплитудно-частотные характеристики входных сопротивлений электрических сетей // II Seminarium Polsko-Ukrainskie "Problemy Elektroenergetyki".- Lodz. - 1998.
3. Гераскин О. Т., Черепанов В. В. Применение вычислительной техники Для расчета высших гармоник в электрических сетях. - М.: ВИПКЭнерго, 1987.