

**В.В. Вахнина**, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехника»  
**А.А. Кувшинов**, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника»  
*Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)*

*Ключевые слова:* система электроснабжения; схема замещения; синхронные турбодвигатели; высшие гармоники.

*Аннотация:* В статье рассмотрены несинусоидальные режимы систем электроснабжения с мощными высоковольтными синхронными турбодвигателями. Мощные высоковольтные синхронные турбодвигатели на промышленных предприятиях предназначены для привода насосов, компрессоров, нагнетателей и других быстроходных механизмов, обычно относятся к электропотребителям первой категории и при прямом включении в электрическую сеть являются наиболее чувствительной нагрузкой к несинусоидальным режимам системы электроснабжения, т. к. в условиях ухудшения качества напряжения питания может произойти нарушение их статической и динамической устойчивости. Рассмотрена исходная схема замещения высоковольтных синхронных турбодвигателей по продольной и поперечной осям в синхронном установившемся режиме. На схеме замещения реальная трехфазная статорная обмотка двигателя представлена системой двух ортогональных вращающихся контуров – продольного и поперечного, а массивный гладкий ротор – контуром обмотки возбуждения, продольным и поперечным демпферными контурами. Приведена схема замещения высоковольтных синхронных турбодвигателей для высших гармоник по продольной и поперечной осям, в которой дополнительно учтены увеличение активных и индуктивных сопротивлений статора и ротора на повышенных частотах, скольжение  $n$ -й гармоники вращающегося магнитного поля. Получены аналитические выражения для определения параметров схемы замещения высоковольтных синхронных турбодвигателей при расчете несинусоидальных режимов системы электроснабжения. Полученные выражения для среднего эквивалентного комплексного сопротивления синхронных турбодвигателей для  $n$ -й гармоники позволяют определить токи высших гармоник, протекающих в статорных обмотках, и оценить степень их неблагоприятного воздействия на условия сохранения синхронного установившегося режима при несинусоидальных режимах системы электроснабжения.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время распространенным видом искажений в электрических сетях являются высшие гармоники [1]. Несинусоидальные режимы оказывают негативное воздействие на все электроприемники предприятий [2; 3]. Наиболее чувствительной к несинусоидальным режимам является электродвигательная нагрузка, особенно мощные высоковольтные синхронные двигатели (СД) с прямым включением в электрическую сеть.

При несинусоидальности линейных напряжений в установившихся режимах работы синхронных двигателей во временных зависимостях токов статорных обмоток присутствуют высшие гармонические составляющие. В результате электромагнитный момент содержит постоянные и пульсирующие составляющие. Это приводит к дополнительным потерям в магнитопроводах и обмотках, к перегреву магнитопровода и обмоток, повышенным шумам и вибрациям, неравномерности вращения ротора двигателя, нарушению статической устойчивости, в результате которой угловая частота вращения ротора может существенно отличаться от синхронной [4; 5]. Поэтому при анализе несинусоидальных режимов систем электроснабжения наибольший интерес представляют мощные высоковольтные СД, т. к. в условиях ухудшения качества напряжения питания может произойти нарушение их статической и динамической устойчивости [6].

## **ИСХОДНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ**

Мощные высоковольтные синхронные двигатели на промышленных предприятиях предназначены для привода насосов, компрессоров, нагнетателей и других

быстроходных механизмов и обычно относятся к электропотребителям первой категории [7]. В технологических процессах непрерывных производств большое распространение получили высоковольтные синхронные турбодвигатели (СТД), которые представляют собой неявнополюсные (двухполюсные) синхронные машины с массивным ротором, который имеет вид бочки с профрезированными пазами для укладки обмотки возбуждения. Обмотка статора выполняется двухслойная катушечного или стержневого типа в зависимости от мощности турбодвигателя [8; 9].

Особенность синхронных двигателей серии СТД заключается в том, что на массивном гладком роторе имеется только обмотка возбуждения, расположенная по продольной оси, и отсутствуют сосредоточенные демпферные обмотки. Бочка ротора выполняет функции распределенной демпферной системы, которая учитывается двумя эквивалентными демпферными контурами – в продольной и поперечной осях [10].

Ввиду магнитной и электрической несимметрии ротора, обусловленной обмоткой возбуждения, схемы замещения СТД по продольной и поперечной осям различаются, как показано на рис. 1 [11].

На схеме замещения реальная трехфазная статорная обмотка представлена системой двух ортогональных вращающихся контуров – продольного и поперечного, а массивный гладкий ротор – контуром обмотки возбуждения, продольным и поперечным демпферными контурами.

Активные и индуктивные сопротивления в схеме замещения СТД (рис. 1) определяются по выражениям, приведенным в [12–18].

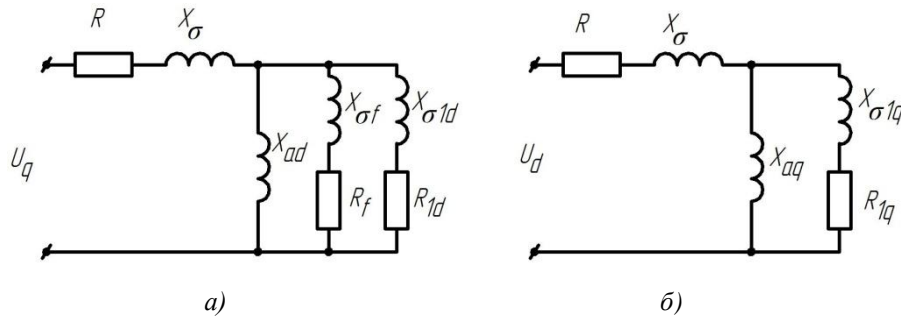


Рис. 1. Исходная схема замещения СТД

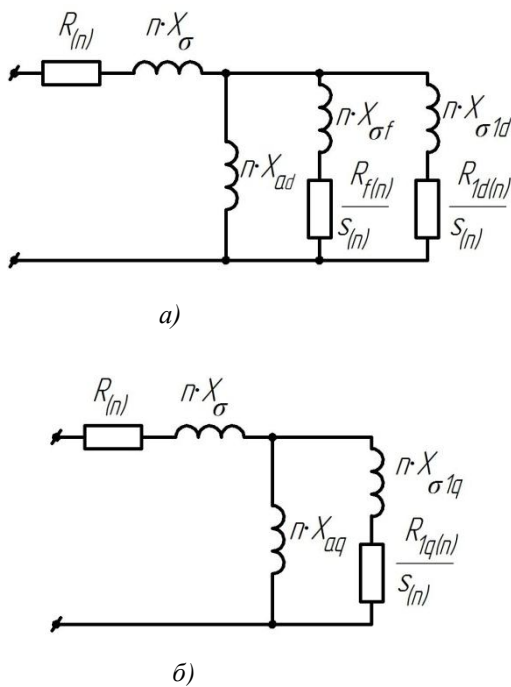
по продольной (а) и поперечной (б) осям в синхронном установившемся режиме  
 $R, x_{\sigma}$  – активное и индуктивное сопротивления рассеяния статорной обмотки;  
 $x_{ad}, x_{aq}$  – сопротивление взаимоиндукции между статорной и роторной обмотками по продольной и поперечной осям;  
 $R_f, x_{\sigma f}$  – активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки возбуждения;  
 $x_{\sigma 1d}, x_{\sigma 1q}$  – индуктивные сопротивления рассеяния продольного и поперечного демпферных контуров;  
 $R_{1d}, R_{1q}$  – активные сопротивления продольного и поперечного демпферных контуров

**СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК**

При несинусоидальных режимах систем электропитания, если не учитывать насыщение магнитопровода, СТД можно рассматривать как линейную систему, для которой применим принцип суперпозиции. В этом случае анализ проводится независимо для основной составляющей и каждой высшей гармоники. В частности, потребляемые ток и момент СТД равны сумме составляющих токов и моментов от каждой гармоники. Схема замещения СТД для высших гармоник тока показана на рис. 2.

В отличие от основной схемы замещения, изображенной на рис. 1, дополнительно учитываются [1; 19]:  
 – линейное увеличение всех индуктивных сопротивлений в  $n$  раз;  
 – скольжение ( $s_{(n)}$ )  $n$ -й гармоники магнитодвижущей силы прямой или обратной последовательности, создаваемой  $n$ -й гармоникой фазных токов статорной обмотки. Величина скольжения  $s_{(n)}$  вращающегося магнитного поля, обусловленного  $n$ -й гармоникой тока статорной обмотки, определяется при сохранении синхронного движения ротора выражением

$$s_{(n)} = \frac{(n \mp 1) \pm s}{n}, \tag{1}$$



где верхний знак соответствует гармоникам тока статорной обмотки прямой последовательности, нижний знак соответствует гармоникам тока статорной обмотки обратной последовательности;  
 – увеличение активных сопротивлений статора и ротора вследствие поверхностного эффекта на повышенных частотах. Зависимость активных сопротивлений контуров СТД от частоты аппроксимируется эмпирическим выражением

$$R_{(n)} = R_{(1)} \cdot \sqrt{n}, \tag{2}$$

где  $R_{(1)}$  – сопротивление контура на частоте основной гармоники.

Тогда значения активных сопротивлений на схеме замещения рис. 2 определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} R_{(n)} &= R_{(1)} \cdot \sqrt{n} \\ R_{f(n)} &= R_f \cdot \sqrt{n} \end{aligned} \tag{3}$$

Рис. 2. Схема замещения СТД для высших гармоник тока по продольной (а) и поперечной (б) осям

$$R_{1d(n)} = R_{1q(n)} = R_{1d} \cdot \sqrt{n}$$

**СРЕДНЕЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЕ КОМПЛЕКСНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СИНХРОННОГО ТУРБОДВИГАТЕЛЯ ПО ДВУМ ОСЯМ**

Для оценки степени воздействия отдельных гармоник на режим работы двигателя целесообразно определить среднее эквивалентное комплексное сопротивление СТД по двум осям [20], которое на частоте основной гармоники согласно схеме замещения, изображенной на рис. 1, определяется выражением

$$\dot{Z}_{d-q} = R + jx_{\sigma} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\dot{Y}_{ad} + \dot{Y}_f + \dot{Y}_{1d}} + \frac{1}{\dot{Y}_{aq} + \dot{Y}_{1q}} \right), \quad (4)$$

где  $\dot{Y}_{ad} = \frac{1}{jx_{ad}} = -jb_{ad}$  – комплексная проводимость

взаимоиндукции между обмотками статора и контурами ротора по продольной оси;

$\dot{Y}_f = g_f - jb_f$  – комплексная проводимость обмотки возбуждения;

$g_f = \frac{R_f}{R_f^2 + x_f^2}$  – активная проводимость обмотки возбуждения;

буждения;

$b_f = \frac{x_f}{R_f^2 + x_f^2}$  – реактивная проводимость обмотки возбуждения;

буждения;

$\dot{Y}_{1d} = g_{1d} - jb_{1d}$ ;  $g_{1d} = \frac{R_{1d}}{R_{1d}^2 + x_{\sigma 1d}^2}$ ;  $b_{1d} = \frac{x_{\sigma 1d}}{R_{1d}^2 + x_{\sigma 1d}^2}$  –

комплексная, активная и реактивная проводимости продольного демпферного контура соответственно;

$\dot{Y}_{aq} = -jb_{aq}$ ;  $b_{aq} = \frac{1}{x_{aq}}$  – комплексная и реактивная

проводимости взаимоиндукции между обмоткой статора и контурами ротора по поперечной оси;

$\dot{Y}_{1q} = g_{1q} - jb_{1q}$ ;  $g_{1q} = \frac{R_{1q}}{R_{1q}^2 + x_{\sigma 1q}^2}$ ;  $b_{1q} = \frac{x_{\sigma 1q}}{R_{1q}^2 + x_{\sigma 1q}^2}$  –

комплексная, активная и реактивная проводимости поперечного демпферного контура соответственно.

Путем ряда последовательных преобразований выражение (4) можно свернуть и записать в виде

$$\dot{Z}_{d-q} = R_{d-q} + jx_{d-q}, \quad (5)$$

где  $R_{d-q} = R + 0,5 \cdot (R_{\Sigma d} + R_{\Sigma q})$ ;

$x_{d-q} = x_{\sigma} + 0,5 \cdot (x_{\Sigma d} + x_{\Sigma q})$  – средние эквивалентные активные и реактивные сопротивления по двум осям;

$R_{\Sigma d} = \frac{g_{\Sigma d}}{g_{\Sigma d}^2 + b_{\Sigma d}^2}$ ;  $R_{\Sigma q} = \frac{g_{1q}}{g_{1q}^2 + b_{\Sigma q}^2}$  – суммарные актив-

ные сопротивления параллельных ветвей схемы замещения (рис. 1) по продольной и поперечной осям соответственно;

$g_{\Sigma d} = g_f + g_{1d}$ ;  $b_{\Sigma d} = b_{ad} + b_f + b_{1d}$  – суммарные активная и реактивная проводимости параллельных ветвей

схемы замещения (рис. 1) по продольной оси соответственно;

$b_{\Sigma q} = b_{aq} + b_{1q}$  – суммарная реактивная проводимость параллельных ветвей схемы замещения (рис. 1) по поперечной оси;

$x_{\Sigma d} = \frac{b_{\Sigma d}}{g_{\Sigma d}^2 + b_{\Sigma d}^2}$ ;  $x_{\Sigma q} = \frac{b_{\Sigma q}}{g_{1q}^2 + b_{\Sigma q}^2}$  – суммарные реак-

тивные сопротивления параллельных ветвей схемы замещения (рис. 1) по продольной и поперечной осям соответственно.

Выражению (5) соответствует схема замещения СТД в виде среднего эквивалентного комплексного сопротивления, приведенная на рис. 3.

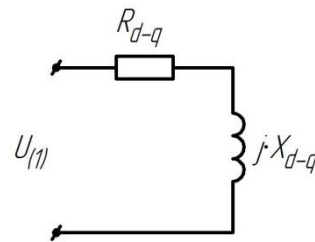


Рис. 3. Схема замещения СТД средним эквивалентным комплексным сопротивлением

**СРЕДНЕЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЕ КОМПЛЕКСНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СИНХРОННОГО ТУРБОДВИГАТЕЛЯ ПО ДВУМ ОСЯМ ДЛЯ N-Й ГАРМОНИКИ**

Среднее эквивалентное комплексное сопротивление СТД по двум осям для n-й гармоники схеме замещения, изображенной на рис. 2, определяется выражением

$$\dot{Z}_{d-q(n)} = R_{(n)} + jn \cdot x_{\sigma} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\dot{Y}_{ad(n)} + \dot{Y}_f(n) + \dot{Y}_{1d(n)}} + \frac{1}{\dot{Y}_{aq(n)} + \dot{Y}_{1q(n)}} \right), \quad (6)$$

где  $\dot{Y}_{ad(n)} = \frac{-jb_{ad}}{n}$  – комплексная проводимость взаи-

моиндукции между обмоткой статора и контурами ротора по продольной оси для n-й гармоники;

$\dot{Y}_f(n) = g_{f(n)} - jb_{f(n)}$ ;  $g_{f(n)} = \frac{(R_{f(n)} / s_{(n)})}{(R_{f(n)} / s_{(n)})^2 + (n \cdot x_f)^2}$ ;

$b_{f(n)} = \frac{(n \cdot x_f)}{(R_{f(n)} / s_{(n)})^2 + (n \cdot x_f)^2}$  – комплексная, активная

и реактивная проводимости обмотки возбуждения для n-й гармоники;

$\dot{Y}_{1d(n)} = g_{1d(n)} - jb_{1d(n)}$ ;

$g_{1d(n)} = \frac{(R_{1d(n)} / s_{(n)})}{(R_{1d(n)} / s_{(n)})^2 + (n \cdot x_{\sigma 1d})^2}$ ;

$b_{1d(n)} = \frac{(n \cdot x_{\sigma 1d})}{(R_{1d(n)} / s_{(n)})^2 + (n \cdot x_{\sigma 1d})^2}$  – комплексная, ак-

тивная и реактивная проводимости продольного демпферного контура для  $n$ -й гармоники;

$$Y_{aq(n)} = \frac{-jb_{aq}}{n} \text{ – комплексная проводимость взаимои-}$$

дукции между обмоткой статора и контурами ротора по поперечной оси для  $n$ -й гармоники;

$$Y_{1q(n)} = g_{1q(n)} - jb_{1q(n)}; g_{1q(n)} = \frac{(R_{1q(n)} / s_{(n)})}{(R_{1q(n)} / s_{(n)})^2 + (n \cdot x_{\sigma 1q})^2};$$

$$b_{1q(n)} = \frac{(n \cdot x_{\sigma 1q})}{(R_{1q(n)} / s_{(n)})^2 + (n \cdot x_{\sigma 1q})^2} \text{ – комплексная, актив-}$$

ная и реактивная проводимости поперечного демпферного контура для  $n$ -й гармоники.

Выражение (6) можно свернуть и записать в виде

$$\dot{Z}_{d-q(n)} = R_{d-q(n)} + jx_{d-q(n)}, \quad (7)$$

где  $R_{d-q(n)} = R_{(n)} + 0,5 \cdot (R_{\Sigma d(n)} + R_{\Sigma q(n)})$ ;

$x_{d-q(n)} = n \cdot x_{\sigma} + 0,5 \cdot (x_{\Sigma d(n)} + x_{\Sigma q(n)})$  – средние эквивалентные активное и реактивное сопротивления по двум осям для  $n$ -й гармоники;

$$R_{\Sigma d(n)} = \frac{g_{\Sigma d(n)}}{g_{\Sigma d(n)}^2 + b_{\Sigma d(n)}^2}; R_{\Sigma q(n)} = \frac{g_{1q(n)}}{g_{1q(n)}^2 + b_{\Sigma q(n)}^2} \text{ – сум-}$$

марные активные сопротивления параллельных ветвей схемы замещения (рис. 2) для  $n$ -й гармоники по продольной и поперечной осям соответственно;

$$g_{\Sigma d(n)} = g_{f(n)} + g_{1d(n)}; b_{\Sigma d(n)} = \left(\frac{b_{ad}}{n}\right) + b_{f(n)} + b_{1d(n)} \text{ – сум-}$$

марные активная и реактивная проводимости параллельных ветвей схемы замещения (рис. 2) по продольной оси для  $n$ -й гармоники соответственно;

$$b_{\Sigma q(n)} = \left(\frac{b_{aq}}{n}\right) + b_{1q(n)} \text{ – суммарная реактивная проводи-}$$

мость параллельных ветвей схемы замещения (рис. 2) по поперечной оси для  $n$ -й гармоники;

$$x_{\Sigma d(n)} = \frac{b_{\Sigma d(n)}}{g_{\Sigma d(n)}^2 + b_{\Sigma d(n)}^2}; x_{\Sigma q(n)} = \frac{b_{\Sigma q(n)}}{g_{1q(n)}^2 + b_{\Sigma q(n)}^2} \text{ – суммар-}$$

ные реактивные сопротивления параллельных ветвей схемы замещения (рис. 2) для  $n$ -й гармоники по продольной и поперечной осям соответственно.

На основании (7) схему замещения СТД для высших гармоник, изображенную на рис. 2, можно существенно упростить к виду, показанному на рис. 4.

Если к одной секции шин высоковольтного распределительного устройства подключаются  $N$  однотипных синхронных двигателей, то среднее эквивалентное комплексное сопротивление для  $n$ -й гармоники определяется по формуле

$$\dot{Z}_{d-q(n)}^{(N)} = \frac{1}{N} \cdot \dot{Z}_{d-q(n)} = \frac{1}{N} \cdot R_{d-q(n)} + \frac{1}{N} \cdot jx_{d-q(n)}. \quad (8)$$

Следовательно, схема замещения высоковольтных синхронных турбодвигателей для высших гармоник при расчете несинусоидальных режимов систем электроснабжения может быть представлена средним экви-

валентным комплексным сопротивлением для  $n$ -й гармоники.

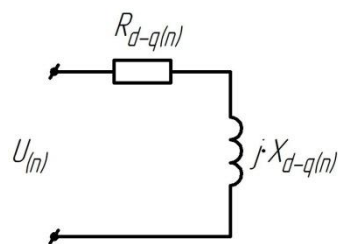


Рис. 4. Схема замещения СТД для высших гармоник средним эквивалентным комплексным сопротивлением

### ВЫВОДЫ

Получены аналитические выражения для определения параметров схем замещения высоковольтных синхронных турбодвигателей в присутствии высших гармоник в системе электроснабжения. Полученные выражения для среднего эквивалентного комплексного сопротивления синхронных турбодвигателей для  $n$ -й гармоники позволяют определить токи высших гармоник, протекающих в статорных обмотках, и оценить степень их неблагоприятного воздействия на условия сохранения синхронного установившегося режима при несинусоидальных режимах системы электроснабжения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2004. 358 с.
2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергоатомиздат, 2005. 261 с.
3. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев [и др.]. М.: МЭИ, 2006. 320 с.
4. Куско А., Томпсон М. Качество энергии в электрических сетях. М.: Додэка-XXI, 2008. 336 с.
5. Бабичев С.А. Анализ повреждаемости синхронных двигателей ГПА на КС ООО «Газпром трангаз Нижний Новгород» // Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций. Н.Новгород, 2010. С. 131–146.
6. Гамазин С.И., Цырук С.А., Понаровский Д.Б. Установившийся режим и переходные процессы турбодвигателей с расщепленной обмоткой // Промышленная энергетика. 1994. № 5. С. 37–42.
7. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электрической энергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
8. Видеман Е., Келленбергер В. Конструкции электрических машин. Л.: Энергия, 1972. 520 с.
9. Лютер Р.А. Расчет синхронных машин. Л.: Энергия, 1979. 272 с.
10. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005. 480 с.
11. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. М.: МЭИ, 1997. 424 с.

12. Конкордия Ч. Синхронные машины. Переходные и установившиеся процессы. М.: Госэнергоиздат, 1959. 272 с.
13. Гамазин С.И., Садыкбеков В.М., Пупин В.М. Определение расчетных параметров и пусковых характеристик синхронных турбодвигателей // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1982. № 12. С. 8–10.
14. Горев А.А. Переходные процессы в синхронных машинах. Л.: Наука, 1985. 543 с.
15. Нейман Л.П. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. М.: Госэнергоиздат, 1949. 190 с.
16. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. М.: Высш. школа, 1978. 319 с.
17. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
18. Федоров А.А., Гамазин С.И., Садыкбеков В.М. Определение расчетных параметров синхронных двигателей с массивным ротором // Промышленная энергетика. 1981. № 1. С. 27–31.
19. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
20. Иванов–Смоленский А.В. Электрические машины. В 2 т. Т. 1. М.: МЭИ, 2006. 532 с.
7. Ivanov V.S., Sokolov B.I. *Rezhimi potrebleniya i kachestvo elektricheskoy energii system elektrosnabzheniya promishlennih predpriyatij* [Use conditions and quality of electric power systems of industrial enterprises power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1987, 336 p.
8. Videman E., Kellenberger V. *Konstruktsii elektricheskikh mashin* [Electric machines structures]. Leningrad, Energiya publ., 1972, 520 p.
9. Luter R.A. *Raschet sinhronnih mashin* [Synchronous machines calculation]. Leningrad, Energiya publ., 1979, 272 p.
10. Katsman M.M. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Electric machines guide]. Moscow, Akademiya publ., 2005, 480 p.
11. Gamazin S.I., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. *Perehodnie protsessi v sistemah promishlennogo elektrosnabzheniya, obuslovlennye elektrodvigatelnoy nagruzkoy* [Transient phenomena within industrial electric power supply systems caused by electromotor loading]. Moscow, MEI publ., 1997, 424 p.
12. Concordia Ch. *Synchronous machines. Theory and Performance*. New York, Wiley, 1951, 272 p.
13. Gamazin S.I., Sadykbekov V.M., Pupin V.M. Determination of design parameters and starting characteristics of synchronous turbo-motors. *Transport i khranenie nefi i nefteproduktov*, 1982, no. 12, pp. 8–10.
14. Gorev A.A. *Perehodnie protsessi v sinhronnih mashinah* [Transient phenomena in synchronous machines]. Leningrad, Nauka publ., 1985, 543 p.
15. Neyman L.P. *Poverhnostniy effect v ferromagnitnih telah* [Skin effect in ferromagnetic bodies]. Moscow, Gosenergoizdat publ., 1949, 190 p.
16. Postnikov I.M. *Obobshchennaya teoriya i perehodnie protsessi elektricheskikh mashin* [Unified theory and transient phenomena of electric machines]. Moscow, Visshaya shkola publ., 1978, 319 p.
17. Syromyatnikov I.A. *Rizhimi raboti asinhronnih i sinhronnih elektrodvigateley* [Working modes of asynchronous and synchronous electric motors]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1984, 240 p.
18. Fedorov A.A., Gamazin S.I., Sadykbekov V.M. Determination of design values of synchronous motors with solid rotor. *Promishlennaya energetika*, 1981, no. 1, pp. 27–31.
19. Arrillaga J., Bradley D., Bojer P. *Garmoniki v elektricheskikh sistemah* [Harmonics in electrical systems]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1990, 320 p.
20. Ivanov–Smolentskiy A.V. *Elektricheskije mashini. Tom 1* [Electrical machines. Vol. 1]. Moscow, MEI publ., 2006, 532 p.

#### REFERENCES

1. Zhezhelenko I.V. *Visshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatij* [Higher harmonics in electric power supply systems of production enterprises]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2004, 358 p.
2. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Kachestvo elektroenergii na promishlennih predpriyatiyah* [Electric power quality at the industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat publ., 2005, 261 p.
3. Kartashev I.I. et al. *Upravlenie kachestvom elektroenergii* [Electric power quality management]. Moscow, MEI publ., 2006, 320 p.
4. Kusko A., Tompson M. *Kachestvo energii v elektricheskikh setyah* [Power Quality in Electrical Systems]. Moscow, Dodeka-XXI publ., 2008, 336 p.
5. Babichev S.A. Analysis of synchronous motors of gas compressor units at the Gas compressor station "Gasprom transgas Nizhny Novgorod". *Energoberezhenie i avtomatizatsiya elektrooborudovaniya kompressornih stantsiy*. Nizhny Novgorod, 2010, pp. 131–146.
6. Gamazin S.I., Tsyruk S.A., Ponarovskiy D.B. Steady state mode and transient phenomena of divided winding turbo-motors. *Promishlennaya energetika*, 1994, no. 5, pp. 37–42.

## EQUIVALENT CIRCUITS OF HIGH-VOLTAGE SYNCHRONOUS TURBO-MOTORS FOR CALCULATION OF NONSINUSOIDAL MODES OF POWER SUPPLY SYSTEMS

© 2015

*V.V. Vakhnina*, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering

*A.A. Kuvshinov*, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering

*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* power supply system; equivalent circuit; synchronous turbo-motors; harmonics.

*Annotation:* The article considers the non-sinusoidal modes of power supply systems with powerful high-voltage synchronous turbo-motors. Powerful high-voltage synchronous turbo-motors of industrial enterprises designed to drive pumps, compressors, superchargers and other high-speed machines are generally referred to the first category electrical consumers and, when connected directly to the electrical power network, are considered to be the most sensitive to the non-sinusoidal modes of a power supply system, as in the conditions of the supply voltage quality deterioration the loss of their static and dynamic stability can occur. The authors considered the original equivalent circuit of high-voltage synchronous turbo-motors along the longitudinal and transverse axes within the synchronous steady state condition. On the equivalent circuit a real three-phase stator winding of a motor is represented as the system of two orthogonal rotating loops - longitudinal and transverse, and a solid cylindrical rotor – as an excitation winding circuit, longitudinal and transverse damper circuits. The article gives the equivalent circuit of high-voltage synchronous turbo-motors for higher harmonics along the longitudinal and transverse axes, which additionally includes the increase in active and inductive resistance of stator and rotor at high frequencies, and the slip of  $n$ -th harmonic of a rotating magnetic field. The authors obtained the analytical expressions for determination of the parameters of the equivalent circuit of high-voltage synchronous-turbo motors when calculating non-sinusoidal modes of power supply system. The expressions obtained for the average equivalent complex resistance of synchronous turbo-motors for the  $n$ -th harmonic allow to determine the higher harmonics currents that occur in the stator windings, and assess their unfavorable effect on the condition of retaining of simultaneous steady-state mode within non-sinusoidal power supply system modes.