

УДК 621.314:621.391

С. В. Рождественский, К. В. Гончаров

ООО «Южэлектропроект», г. Харьков, Украина

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ В РОТОРЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ПИТАЕМОГО ОТ МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ.

В статье предложена методика определения напряжений высших гармоник, наводимых в роторе неявнополюсного синхронного двигателя при питании от преобразователя частоты. Приводится экспериментальная зависимость коэффициента трансформации синхронного двигателя от частоты напряжения статора. Анализируются выходные напряжения преобразователя частоты с многоуровневой широтно-импульсивной модуляцией. Обосновывается схема подключения синусного фильтра и рассчитываются его параметры. Показано, что применение синусного фильтра позволяет значительно снизить напряжения высших гармоник в статоре и роторе синхронного двигателя.

Ключевые слова: синхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, параметры эквивалентной схемы замещения, гармонический состав, высшие гармоники.

У статті запропоновано методику визначення напруг вищих гармонік, що наводяться в роторі неявнополюсного синхронного двигуна при живленні від перетворювача частоти. Подається експериментальна залежність коефіцієнта трансформації синхронного двигуна від частоти напруги статора. Аналізуються вихідні напруги перетворювача частоти з багаторівневою

широотно-імпульсивною модуляцією. Обґрунтовується схема підключення синусного фільтра і розраховуються його параметри. Показано, що застосування синусного фільтра дозволяє значно знизити напруги вищих гармонік в статорі та роторі синхронного двигуна.

Ключові слова: синхронний двигун, автономний інвертор напруги, параметри еквівалентної схеми заміщення, гармонічний склад, вищі гармоніки.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили преобразователи частоты (ПЧ) на основе автономных инверторов напряжения (АИН). При питании асинхронных двигателей от ПЧ проблема совместимости практически не возникает [1]. Однако при питании синхронных двигателей (СД) от ПЧ необходимо учитывать несколько важных особенностей [2]. Высшие гармоники (ВГ), генерируемые ПЧ, трансформируются в обмотку возбуждения и могут вызывать нарушения работы СД и тиристорного возбудителя. Авторам не удалось найти в литературе методику точного определения напряжений ВГ, наводимых в роторе СД при питании от ПЧ. В данной работе делается попытка устранения этого пробела. Показано также, что применение синусного фильтра в многоуровневом ПЧ позволяет значительно снизить напряжения ВГ в статоре и роторе СД.

Основная часть

На рис. 1 схематично изображен разрез СД. Показаны статорные обмотки, А, В, С, которым соответствуют выходные напряжения ПЧ U_A, U_B, U_C и роторная обмотка с напряжением U_r . Ротор вращается по часовой стрелке с угловой скоростью ω . θ - угол, определяющий положение ротора.

Определим напряжения, наводимые в роторной обмотке возбуждения со статорных обмоток. Считаем, что СД явнополюсный, а также пренебрегаем падениями напряжений в реактивном сопротивлении рассеяния и в активном сопротивлении обмоток статора [3].

Тогда напряжение, трансформируемое из статорной обмотки фазы А в роторную обмотку равно:

$$U_{rA} = U_{sA} \cdot K \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

где K – коэффициент трансформации СД;

U_{rA} – мгновенное значение напряжения, трансформированного в ротор со стороны статорной обмотки фазы А;

U_{sA} – мгновенное значение статорного напряжения фазы А;

θ – угол между осями роторной обмотки и статорной обмотки фазы А, $\theta = \omega \cdot t$,

где ω – синхронная скорость вращения ротора СД, $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}$;

n – синхронная скорость, выраженная в оборотах в минуту.

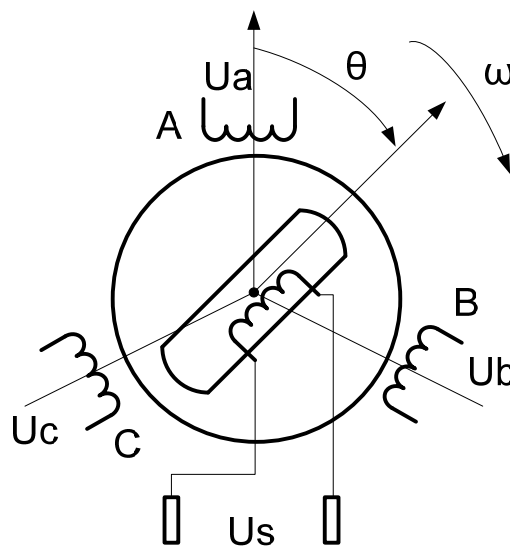


Рис. 1

Для фаз В и С уравнение (1) преобразуется к виду:

$$U_{rB} = U_{sB} \cdot K \cdot \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right), \quad (2)$$

$$U_{rC} = U_{sC} \cdot K \cdot \cos\left(\theta - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right). \quad (3)$$

Суммарное напряжение, наводимое в роторе:

$$U_r = U_{rA} + U_{rB} + U_{rC} = K \cdot [U_{sA} \cdot \cos\theta + U_{sB} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + U_{sC} \cdot \cos\left(\theta - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)]. \quad (4)$$

На рис. 2 представлена схема модели Simulink многоуровневого ПЧ на основе АИН. Каждая фаза ПЧ состоит из пяти последовательно соединенных модулей, схема одного модуля ПЧ приведена на рис. 3.

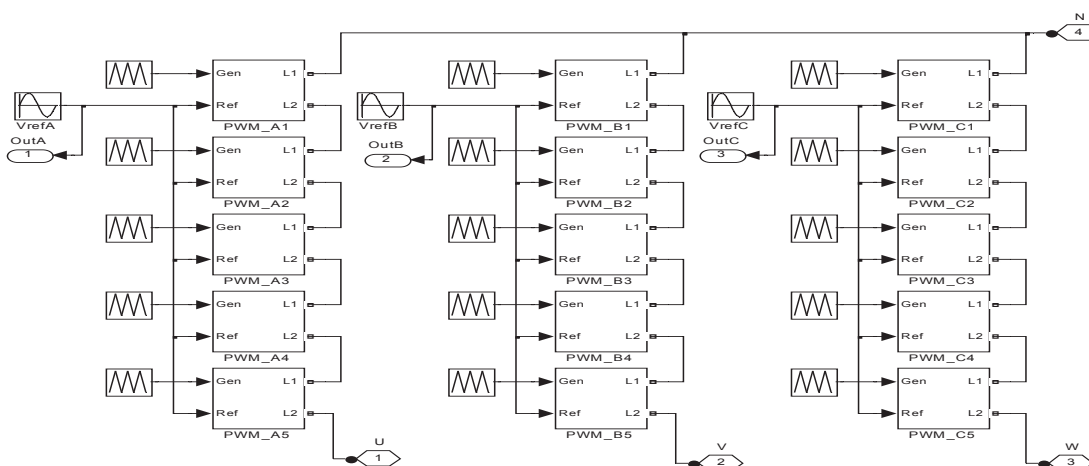


Рис. 2

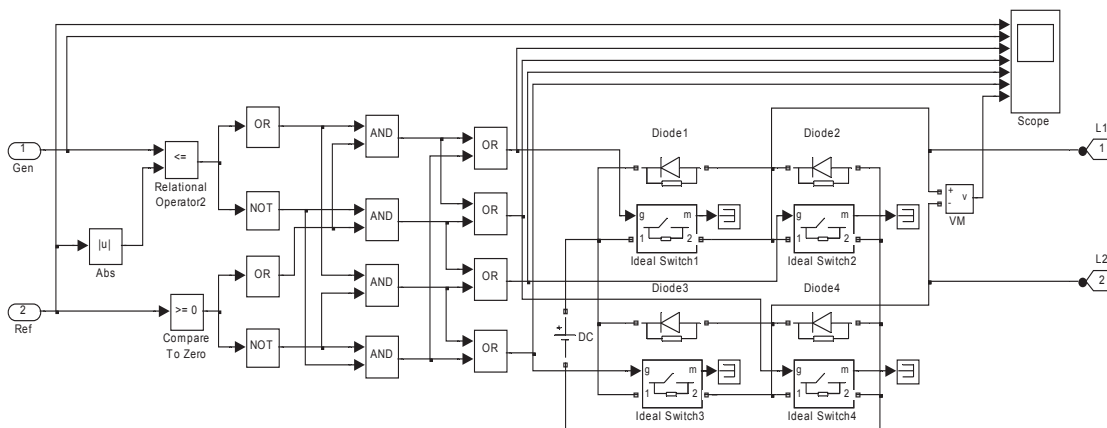


Рис. 3

На рис. 4 представлена общая схема модели, реализующая формулы (1-4) для определения напряжения, наводимого в роторе СД, питаемого от многоуровневого ПЧ. Выход ПЧ подключен к трехфазной активно-индуктивной нагрузке.

Величина тока нагрузки практически не влияет на форму выходных напряжений ПЧ. В модели рассчитывается средняя величина напряжения, наведенного в роторе, определяется разница между мгновенным и средним значениями напряжения ротора, т.е. переменное напряжение, наводимое в роторе, вычисляется действующее значение этого напряжения, а также осциллографируются следующие сигналы: 1 – задания выходных фазных напряжений; 2 – выходные фазные напряжения U, V, W; 3 – общее напряжение, в обмотке возбуждения; 4 – среднее значение напряжения ротора; 5 – действующее значение переменной составляющей напряжения ротора; 6 – коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения W.

Напряжения заданий выходных фазных напряжений ПЧ:

$$U_U = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2} + \delta\right), \tag{5}$$

$$U_V = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \frac{\pi}{2} + \delta\right), \tag{6}$$

$$U_W = U_m \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{4 \cdot \pi}{3} + \frac{\pi}{2} + \delta\right), \tag{7}$$

где δ – угол нагрузки.

На холостом ходу векторы вращающихся магнитных потоков ротора и статора располагаются в одном направлении ($\delta = 0$). При работе СД в режиме двигателя ротор тормозится и ось его магнитного поля будет отставать от оси вращающегося магнитного поля на некоторый угол δ [3]. Этот угол, изменяющийся, очевидно, только с изменением механической нагрузки, и характеризующий нагрузку, называется углом нагрузки δ . Момент $t = 0$ ($\theta = 0$) соответствует максимальному напряжению $3/2 \cdot U_m$, наводимому в обмотке возбуждения при угле $\delta = 0$. Далее вращающемуся ротору соответствует угол $\theta = \omega \cdot t$. При этом, в обмотке возбуждения все время наводится максимальное напряжение $3/2 \cdot U_m$. Намагничивающее действие постоянного напряжения $3/2 \cdot U_m$ компенсируется потоком (ампервитками) обмотки возбуждения. В обмотке возбуждения наводится постоянное напряжение величиной $3/2 \cdot U_m = 7500$ В ($U_m = 5000$ В – амплитуда задания фазного напряжения) и высокочастотная составляющая $U_{вч}$, определяемая пульсациями выходных напряжений модулей ПЧ: U, V, W:

$$U_{вч} = U_r - 3/2 \cdot U_m. \tag{8}$$

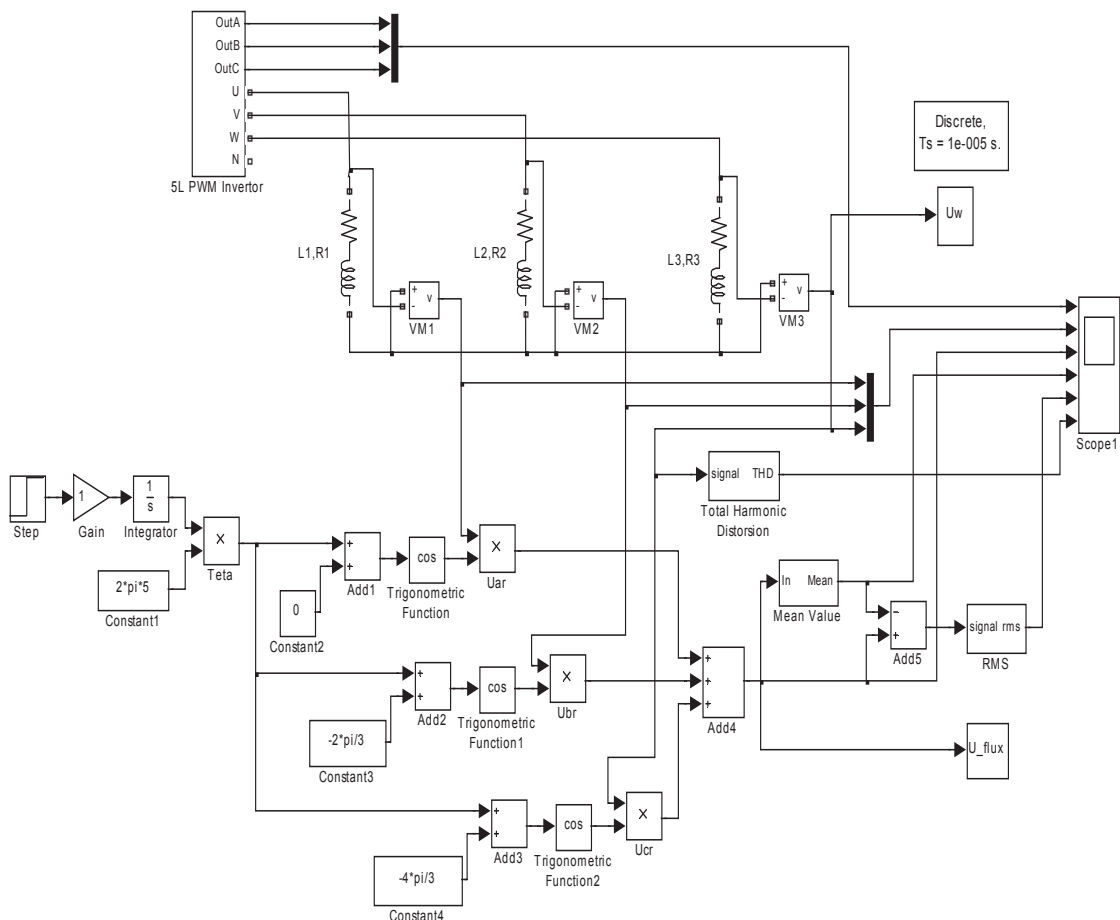


Рис. 4

Условие устойчивой работы СД [3]:

$$-\pi/2 \leq \delta \leq \pi/2 \quad (9)$$

По мере увеличения угла нагрузки δ , уменьшается постоянное напряжение, наводимое в обмотке возбуждения. Если $\delta = \pm\pi/2$, то наводимое в роторе постоянное напряжение равно нулю.

На рис. 5 показаны осциллограммы для выходной частоты ПЧ 50 Гц. На основании этих осциллограмм можно сказать следующее. Действующее значение переменной составляющей наводимого в роторе напряжения $U_{в.ч.50rms} = 607B$. При этом предполагается, что коэффициент трансформации между статором и ротором СД равен единице ($K = W_r/W_s = 1$). Коэффициент искажения синусоидальности (K_U или THD) напряжения фазы $THD = 9,83\%$.

На рис. 6 представлены результаты разложения в ряд Фурье напряжения, наводимого в роторе U_r , для выходной частоты ПЧ 50 Гц. Из графика видно, что в напряжении U_r содержится синусоидальное напряжение частотой 1000 Гц (соответствует частоте ШИМ многоуровневого инвертора), амплитудой $U_{m50(1000)} = 0,9 \cdot 747,6B = 672,84B$

$$(U_{rms50(1000)}) = \frac{672,84}{\sqrt{2}} = 475,77B - \text{действующее значение}.$$

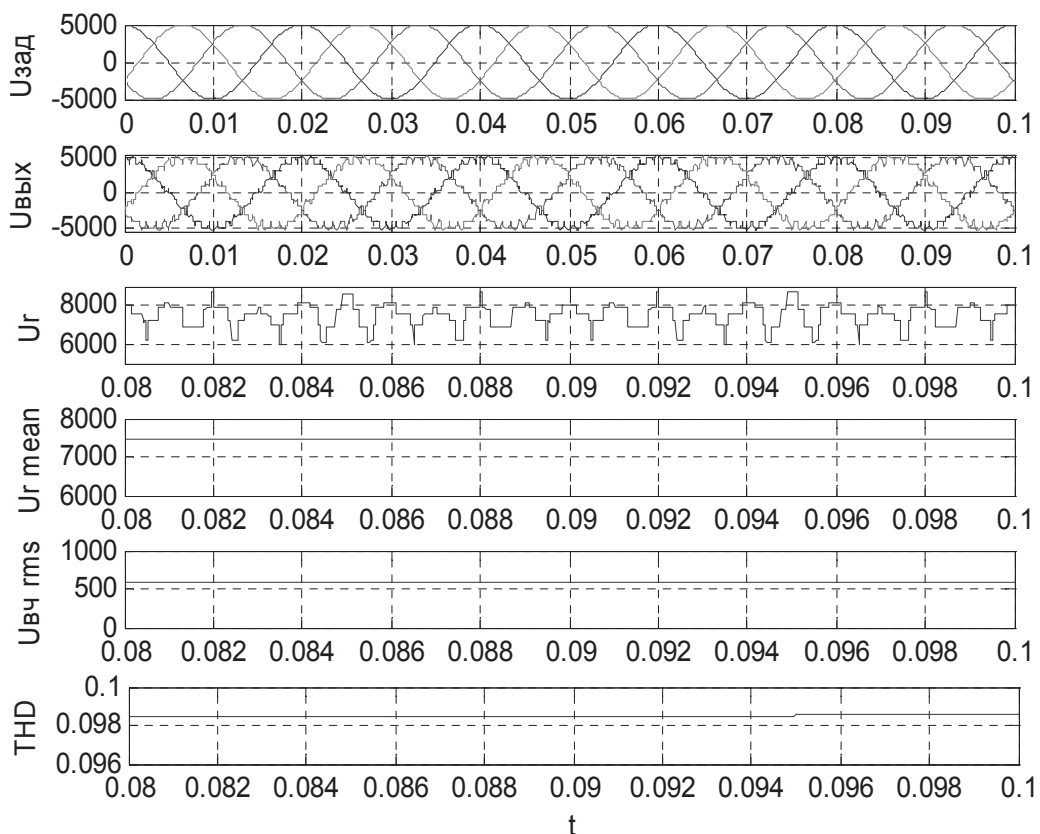


Рис. 5

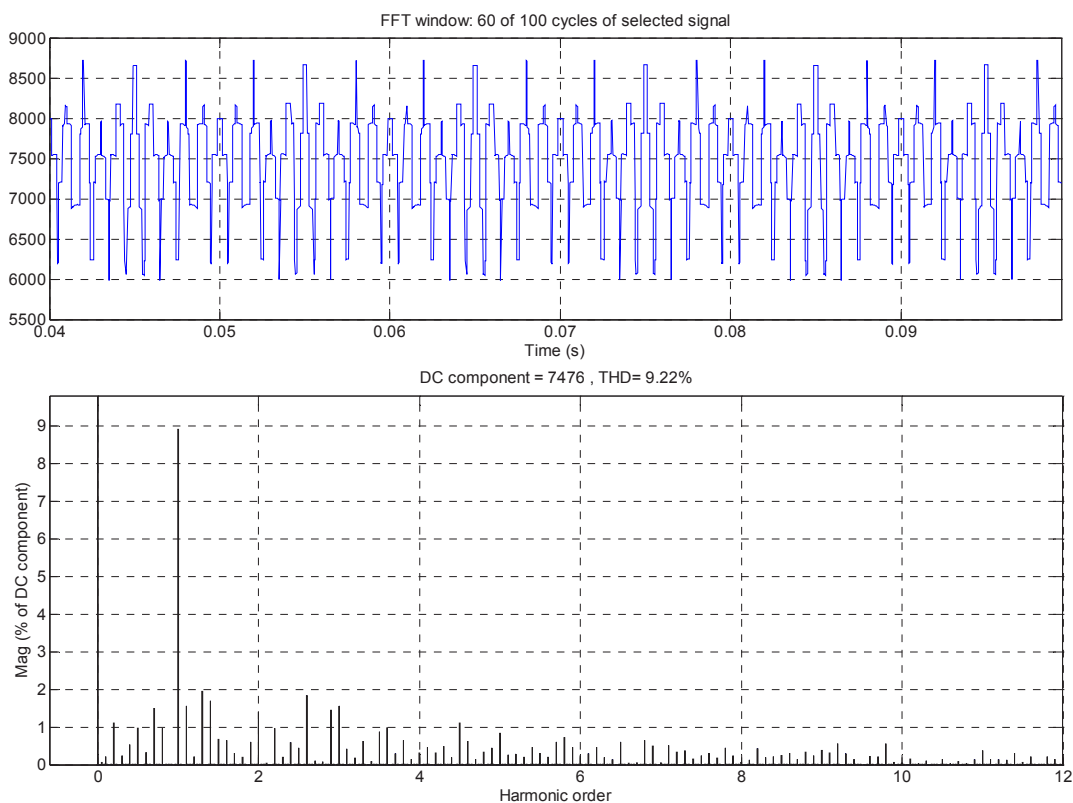


Рис. 6

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента трансформации от частоты питающего напряжения $K(f_{\text{вых}}) = U_r / U_s$, полученная экспериментально для СД типа СДС-15-39-6; 1600 кВт; 6 кВ; 179 А; $\cos\varphi = 0,9$; кпд=95,7%; 1000 об./мин.; ротор 54 В; 265 А. При получении этой зависимости ось статорной обмотки А совмещалась с осью обмотки возбуждения. Статорные обмотки фаз В и С были разомкнуты. На обмотку фазы А от лабораторного генератора подавалось эталонное синусоидальное напряжение регулируемой частоты и амплитуды, а на обмотке возбуждения напряжение измерялось.

Низкое значение коэффициента трансформации K при $f_{\text{вых}} = 50 \text{ Гц}$ объясняется, в основном, влиянием демпферной обмотки СД. Следует отметить, что в СД без демпферной обмотки значение коэффициента трансформации на частоте $f_{\text{вых}} = 50 \text{ Гц}$ значительно выше и примерно равно отношению витков обмоток ротора и статора $K = W_r / W_s$. Кроме того, с ростом частоты $f_{\text{вых}}$ коэффициент трансформации СД дополнительно снижается. Это обусловлено увеличением падения напряжения на сверхпереходном реактивном сопротивлении X_d'' [3], влиянием паразитных емкостей, нелинейностью индуктивностей в схеме замещения СД и др.

Если умножить расчетное действующее значение напряжения 20-й гармоники (1000 Гц) на коэффициент трансформации, полученный опытным путем для этой же частоты, то можно получить реальное действующее значение напряжения частотой 1000 Гц, наводимого в обмотке возбуждения. По графику рис. 7, $f = 1000 \text{ Гц}$ $K_{50(1000)} = 0,8$. $U_{r50(1000)} = 0,8 \cdot 475,77 = 380,62 \text{ В}$. Таким образом, при частоте выходного напряжения ПЧ $f_{\text{вых}} = 50 \text{ Гц}$ в обмотке возбуждения СДС-15-39-6; 1600 кВт; 6 кВ наводится напряжение 380,62 В частотой 1000 Гц. Это напряжение значительно выше номинального напряжения обмотки возбуждения (54 В), и может привести не только к сбоям в работе тиристорного возбудителя, но и к выходу из строя его элементов.

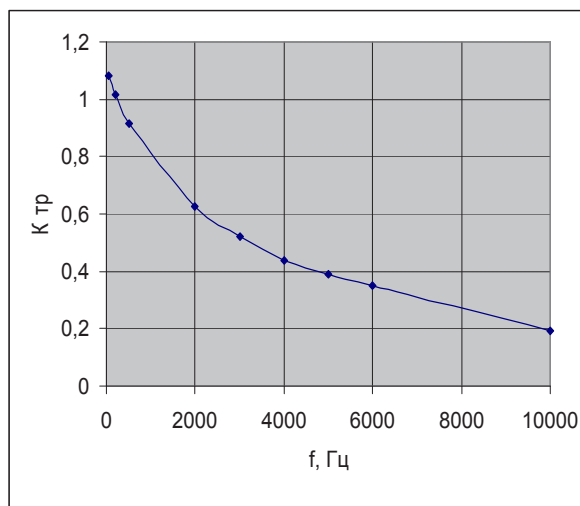


Рис. 7

Очевидно, для снижения напряжения, наводимого в роторе, необходимо уменьшить содержание высших гармоник в напряжениях статора.

Расчеты показывают, что угол δ незначительно влияет на величину высокочастотной составляющей напряжения $U_{вч}$. Поэтому, достигнуть снижения напряжений высших гармоник, наводимых в роторе, возможно при любых режимах работы электропривода. Кроме того, при одной и той же частоте ШИМ, расчетные значения коэффициента искажения THD и высокочастотной составляющей $U_{вч}$, полученные для различных алгоритмов ШИМ (Space Vector, Phase Shifted, Level Shifted) отличаются на несколько процентов. Поэтому рассматриваемый способ снижения напряжений высших гармоник, наводимых в роторе, применим для различных алгоритмов ШИМ.

В работе [4] предлагается управлять модулями ПЧ таким образом, чтобы все блоки формировали напряжения прямоугольной формы без ШИМ, кроме одного блока, дополняющего выходное интегральное напряжение с помощью ШИМ до синусоидальной формы. Кроме того, предлагается синусный фильтр (СФ) подключать только к выходу блока, осуществляющего ШИМ.

Этот алгоритм был опробован в Matlab. Однако анализ показал, что подключение СФ к модулю, осуществляющему ШИМ, не целесообразно, т.к. не позволяет формировать мгновенные перепады напряжения величиной $U_d = 1000В$.

Удовлетворительные результаты удалось получить только с моделью СФ, рассчитанного на полную мощность ПЧ $P_d = 1600кВт$ и подключенного к общему выходному напряжению [1]. После добавления СФ в модель рис. 4 были рассчитаны действующее значение переменной составляющей напряжения ротора $U_{вч}(f_{вых})$ и коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения $K_U(f_{вых})$ в функции выходной частоты ПЧ.

На рис. 8, 9 представлены графики зависимостей $U_{вч}(f_{вых})$, $K_U(f_{вых})$ многоуровневого ПЧ без синусного фильтра ($f_{ШИМ} = 1000Гц$) и с синусным фильтром ($f_{ШИМ} = 3000Гц$).

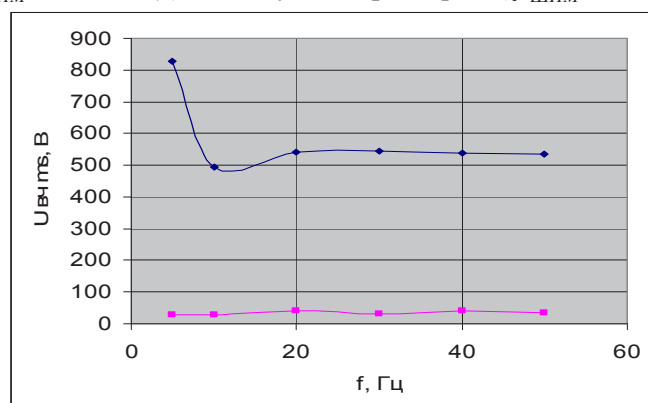


Рис. 8

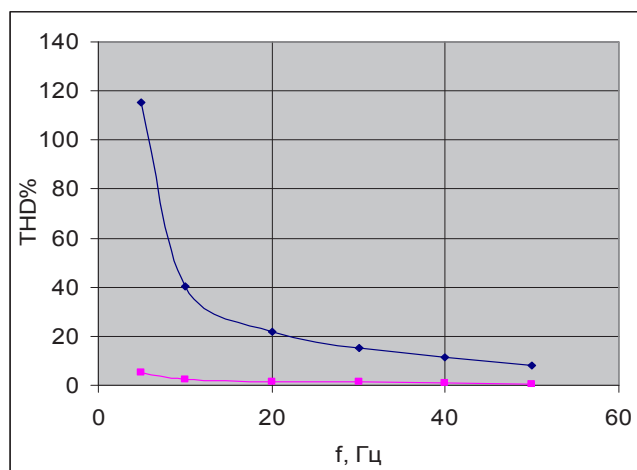


Рис. 9

Вывод

Анализ осциллограмм и рисунков позволяет сделать вывод, что применение СФ позволяет более, чем на порядок, снизить действующее значение напряжения, наводимого в роторе СД, и коэффициент искажения синусоидальности выходного напряжения. Это позволяет облегчить режим работы СД и системы его возбуждения, снизить вихревые токи в обмотках и железе, уменьшить вредное воздействие на изоляцию обмоток СД.

Список литературы

1. Рождественский С. В. Блоки внешнего подключения для преобразователей частоты // Техническая электродинамика. Тем. вип. Силовая электроника та енергоефективність. – 2009. – Ч.3 – С.7–9.
2. Рождественский С. В., Гончаров К. В. Особенности использования преобразователей частоты, питающих мощные синхронные двигатели. // Техническая электродинамика. Тем. вип. Силовая электроника та енергоефективність. – 2012. – Ч.4 – С.11–15.
3. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 744 с.
4. Синчук О. Н., Михайличенко Д. А., Чернышев А. А., и др. Высоковольтный преобразователь частоты и способ управления им. // Техническая электродинамика. Тем. вип. Силовая электроника та енергоефективність. – 2012. – Ч.4 – С.123–127.

REDUCTION OF UPPER VOLTAGE HARMONIC LEVEL IN SYNCHRONOUS MOTOR ROTOR POWERED DUE TO MULTILEVEL FREQUENCY CONVERTOR

S.V. Rozhdestvenskij, K.V. Goncharov
«Yuzhelektroproject» LLC

The article proposes a method for determining upper voltage harmonics induced in the rotor of a [non-salient pole](#) synchronous motor, powered by a frequency converter. Experimental dependence of the transformation of a synchronous motor index on the frequency of stator voltage. Output voltage of the frequency converter with a multi-level impulse ratio modulation is analyzed. Connection pattern of a sine filter is explained and its parameters are calculated. It is shown that the use of a sine filter can significantly reduce upper harmonics voltage in stator and rotor of synchronous motors.

Key words: synchronous motor, self commutated voltage inverter, equivalent circuit parameters, harmonic content, upper harmonic.

1. Rozhdestvenskij S.V. [External Termination Blocks](#) for Frequency Converters // Technical Electrodynamics. Special issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2009. – Pt.3 – P.7–9. (Rus)
2. Rozhdestvenskij S.V., Goncharov K.V. Usage Patterns for Frequency Converters Powering Vigorous Synchronous Motors // Technical Electrodynamics. Special issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2012. – Pt.4 – P.11–15. (Rus)
3. Kovach K.P., Rats I. [Transient Phenomena](#) in [Alternating-Current Machines](#). – M.-L.: National Power Publishing House, 1963. – 744 p. (Rus)

4. *Sinchuk O.N., Mikhajlichenko D.A., Chernyshev A.A., and others.* [High-tension](#) Frequency Converter and Its Operation Mode // Technical Electrodynamics. Special issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2012. – Pt.4 – P.123–127. (Rus)