

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОЙ МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ СТАТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УПРАВЛЯЕМОМ ТРОГАНИИ

*Воробейчик О.С., соискатель, директор ТОВ «Симеол»
50000, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. Тбилисская, 11
E-mail: igor@semiol.dp.ua*

Обговорується процес створення спеціалізованого обладнання для виконання операцій передпускової підготовки потужних синхронних машин приводів рудорозмельних мельниць, насосів по перекачуванню забруднених рідин та інше. Механізми подібного ряду при аварійному останові мають моменти торгання суттєво більш високі, ніж пусковий момент двигуна. В передпусковий період СД підключається до пускового сервісного агрегату, що забезпечує в ході реалізації старт-стопорних режимів руйнування структур матеріалів, що утворилися в робочому просторі технологічних машин. Пристрої формування м.р.с. являють собою тиристорні перетворювачі (основний та допоміжний), що підключаються через мережу 0,4 кВ до статора СД. Тиристорні перетворювачі забезпечують суттєве підвищення ефективності методу за рахунок регулювання амплітуди та фази м.р.с. двигуна при шестикратній та дванадцятикратній комутації вентилів. Виконано аналіз квазівстановлених перехідних процесів при роботі пристрою у межах одного кроку СД при старт-стопорних переміщеннях.

Ключові слова: передпусковий трогання механізмів, пристрої формування м.р.с. СД, шунтуючі преобразователи, алгоритми управління, квазівстановившіся процеси.

The question of creation of the specialized equipment for manufacture of operations of prestarting preparation of powerful synchronous machines of drives orethreshing mills, pumps on swapping the polluted liquids is discussed, etc. Mechanisms similar is glad at emergency to a stop have the moments breakaway essentially higher, than the starting moment of the engine. During prestarting period SM it is connected to the starting service unit providing during realization start-lock of modes destruction of structures of materials, the technological machines formed in working space. Devices of formation m.d.c. Represent tiristors converters (the basic and auxiliary) connected through a network 0,4 kV to stator SM. The converter with tiristors converters provides essential increase of efficiency of a method due to regulation of amplitude and phase MMF of the engine at sixfold and twelfefold switching gates. Schemes and diagrams of inclusion of gates are resulted. It is analysed the kvaziestablished transients at work of the device within the limits of one step SM at start-lock movings.

Key words: prestarting breakaway mechanisms, the device of formation MMF SM, shunting converters, algorithms of management, the kvaziestablished processes.

Введение. Известно, что большая группа технологических механизмов, таких как мельницы, дробилки, насосы и т.д., приводимых в движение мощными синхронными двигателями (СД), имеют тяжелые условия трогания, предшествующего пуску и разгону до требуемой скорости.

Эта особенность обусловлена характерными для вышеперечисленных механизмов технологическими процессами, а именно, изменениями в структуре рабочих объектов, например, слеживанием мелящихся тел и руды в рудоразмельных мельницах, сгущением нефтепродуктов в рабочих механизмах насосов и т. д.

Решением проблем, связанных с троганием, может быть создание комплексной системы электропривода, обеспечивающей в полной мере требования по режимам трогания, дальнейшего запуска и регулированию скорости привода. Стоимость такой системы высока и может в несколько раз превысить стоимость классических систем, обеспечивающих только регулирование частоты вращения [1, 2].

Целью работы является создание устройств для регулирования фазы магнитодвижущей силы СД путем улучшения формы кривой тока статора при реализации.

Материал и результаты исследований. Ввиду вышеперечисленного становится актуальной идея создания несложных силовых систем, способных обеспечивать лишь процесс трогания, с последующим запуском существующими системами регулируемого или нерегулируемого электропривода.

Одним из путей решения поставленной задачи является создание системы трогания с использованием низковольтного тиристорного преобразователя, питаемого от сети 0,4 кВ [1].

Стоимость пусковой системы при этом минимальна.

Дополнительными требованиями к разрабатываемой системе являются возможность определения реального положения ротора двигателя относительно статора, при отсутствии механической связи с валом.

Система должна также обеспечивать возможность осуществления старт – стопорных режимов и трогание двигателя с моментом, в 2-3 раза превышающим номинальный. Наиболее приемлемой пусковой системой, которая удовлетворяет большинству вышеперечисленных требований, является система с использованием тиристорных регуляторов напряжения в цепях якоря СД.

На рис. 1 представлена блок – схема устройства регулирования фазы м.д.с. неподвижного ротора двигателя. Схема включает тиристорный регулятор TP1 (основной сетевой регулятор), TP2 (вспомогательный регулятор шунтирования), ТВ – возбудитель двигателя.

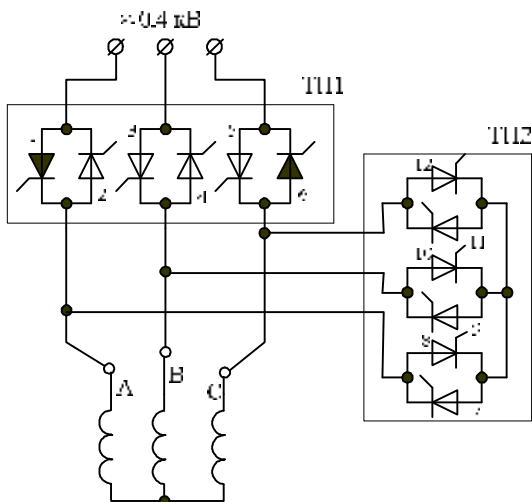


Рисунок 1 – Схема управления с преобразователем для шунтирования обмоток СД

На рис. 2 представлена схема замещения силовой цепи, включающая основные сетевые тиристоры T_1 и T_6 (регулятор TP1) и шунтирующие тиристоры T_7 и T_{12} (регулятор TP2).

Очередность включения тиристоров 1-6 и 7-12 формируется особым образом с целью создания дискретно поворачивающегося поля статора [1]. Алгоритмы могут быть двух видов: один из них обеспечивает поворот м.д.с. на 60, второй – на 30 электрических градусов. Включение шунтирующего регулятора создаст дополнительные возможности для качественного улучшения кривой тока в обмотках статора при отработке того или иного шага.

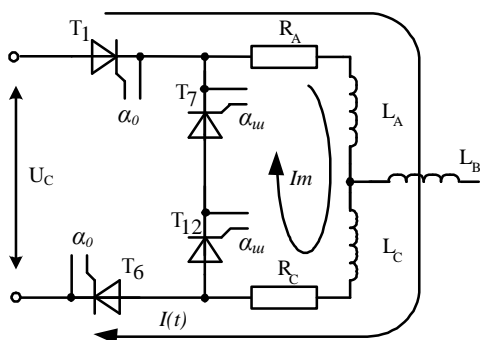


Рисунок 2 – Контур протекания тока при шунтировании обмоток СД

Управление преобразовательным устройством может осуществляться путем изменения угла управления сетевого вентиля (угол α_0), а при необходимости – шунтирующего вентиля ($\alpha' = \alpha_{ш}$).

Выпрямленное напряжение определяется интегралом:

зависимости для определения гармонических составляющих напряжения тока и мощности:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\lambda} \sqrt{2}U \sin(\Omega t) d\Omega t = \frac{U}{\sqrt{2\pi}} (\cos \alpha + \cos(\alpha + \lambda)). \quad (1)$$

Угол λ является сложной функцией угла управления и параметров нагрузки [3, 6, 9].

Этот угол зависит также от схемы выпрямления. Так, при отсутствии шунтирующего вентиля (или при закрытом состоянии его), этот угол зависит как от параметров нагрузки, так и момента закрывания вентиля (естественного при спадании тока до минимального тока удержания или искусственного запирающего при подаче запирающего сигнала на управляющий электрод полностью управляемого вентиля).

Угол проводимости вентиля λ при параметрах нагрузки $\frac{x_n}{R_n} \gg 10 \div 8$ и $\alpha = 0$ может достигать значений, близких к π . Выпрямленное напряжение при этом достаточно близко к нулю.

На рисунке 3 приведены примерные кривые тока, напряжения на нагрузке, а также кривая мгновенной мощности

$$P(t) = U_d(t) \cdot I(t), \quad (2)$$

на интервале проводимости вентиля.

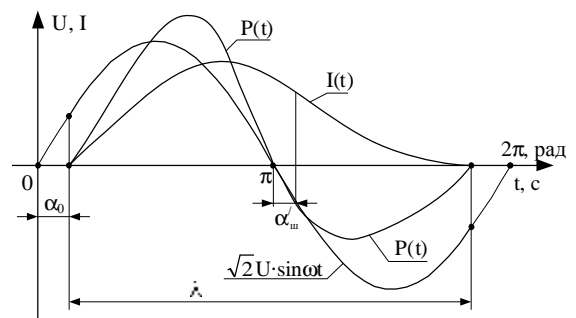


Рисунок 3 – Линейные диаграммы кривых напряжения, тока и мощности в фазном проводе двигателя

При этом анализируется схема без шунтирующего вентиля (тиристоры T_7 , T_{12} закрыты). Как видно из рисунка, при $\omega t > \pi$ – мощность отрицательна, что говорит о возврате энергии в сеть на этом участке. При наличии шунтирующего вентиля тиристоры T_1 и T_6 закрываются при $\omega t = \pi$, а ток обмотки продолжает циркулировать, обеспечивая “разряд” индуктивности на вентили. Ток по якорным обмоткам вместо прерывистого становится непрерывным.

Активная мощность определяется зависимостью

$$P_o = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} U_d(t) \cdot I(t) dt = U_{d0} I_o, \quad (3)$$

где $I_o = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} I(t) dt$ – среднее значение тока на интервале проводимости вентиля.

С учетом сказанного, а также учитывая известные математические подходы, можно получить

независимо друг от друга, тока якоря или тока возбуждения.

$$I(t) = I_0 + \sum_1^i I_{ma} \cos(m\Omega t) + \sum_1^i I_{mb} \sin(m\Omega t), \quad (4)$$

$$U(t) = U_0 + \sum_1^N U_{na} \cos(n\Omega t) + \sum_1^N U_{nb} \sin(n\Omega t), \quad (5)$$

$$P(t) = P_0 + \sum_1^k P_{ka} \cos(k\Omega t) + \sum_1^k I_{kb} \sin(k\Omega t), \quad (6)$$

где m, n, k – порядок гармонических тока, напряжения и мощности; $I_{ma}, I_{mb}, U_{na}, U_{nb}, P_{ka}, P_{kb}$ – ортогональные составляющие соответствующих параметров энергетического режима.

Выполненный математический подход позволяет решить и другую задачу – определение гармонического состава момента, развиваемого двигателем на исследуемом интервале [2, 4, 5]:

$$M_o(t) = K_M \cdot I(t) \cdot I_b(t) \sin \gamma, \quad (7)$$

где γ – угол рассогласования между осями м.д.с. системы статорных обмоток и ротора; I_o – зависимость тока возбуждения от времени; K_M – конструктивный коэффициент двигателя.

Можно заметить, что гармонический состав момента можно изменять соответствующим образом путем изменения гармонического состава отдельно,

Остановимся только на отмеченных возможностях анализируемых технических решений.

В случае наличия шунтирующего вентиля выражение для выходного напряжения должно учитывать как конструкцию преобразовательного устройства, так и параметры нагрузки:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}\Phi}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha'} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{2}U}{2\pi} (\cos \alpha_0 + \cos \alpha_{\pi}) \cdot \quad (8)$$

В приведенном выражении α_{π} – угол управления шунтирующим вентилем.

Из схемы замещения устройства питания, представленной на рис. 4, следует система уравнений:

$$I_C = I_A + I_B,$$

$$U_{dA} = I_A R_A + (I_A + I_B) R_C, \quad (9)$$

$$U_{dB} = I_B R_B + (I_A + I_B) R_C.$$

Управление главными и шунтирующими вентилями позволяет осуществлять перераспределение токов в фазных обмотках двигателя и, тем самым, регулировать фазу м.д.с. статорных обмоток, которая, как известно, определяется геометрической суммой м.д.с. обмоток, обтекаемых током. Управление вентилями основного и вспомогательного преобразователей позволяют формировать фазу м.д.с в диапазоне, близком к $\frac{\pi}{6}$.

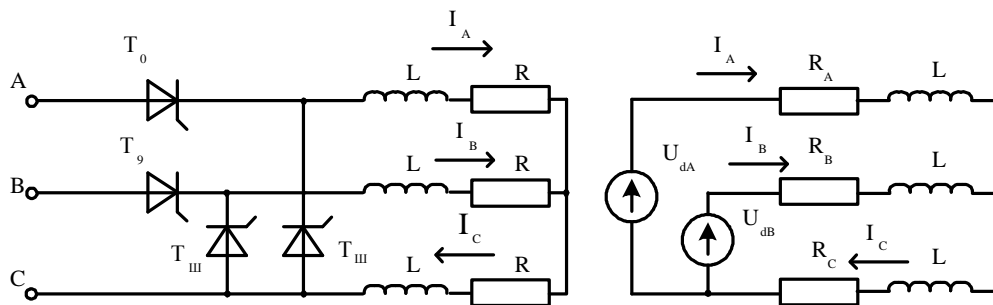


Рисунок 4 – Схема устройства питания трех фаз статора с шунтирующими вентилями и схема ее замещения

Дополнительные возможности имеет более простая схема питания, нашедшая в свое время применение в качестве возбудителя асинхронных высоковольтных двигателей в системах их динамического нагружения.[7].

Один из вариантов устройства, обеспечивающего протекание тока по всем обмоткам статора при его работе, представлен на рис. 5.

Эта схема достаточно интересна, но мало изучена. Характерно при этом, что фазные обмотки А и С обтекаются током, определяемым напряжением U_C и сопротивлениями фаз обмоток. С другой стороны, каждый из вентиляей T_1 или T_2 поочередно выполняют роль шунтирующих вентиляей. Так, если T_1 находится в проводящем состоянии, то вентиль T_2 выполняет роль шунтирующего, разряжая индуктивность L_B на сопротивление R_C .

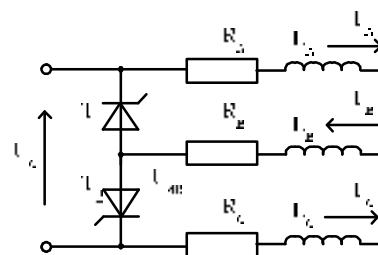


Рисунок 5 – Двухвентильная схема питания трех фаз двигателя

Эффективность шунтирующего вентиля в схеме однофазного выпрямителя известна частично по той причине, что особенности применения таких схем выпрямления не позволяют в полной мере оценить показатели эффективности. Одна из этих особенностей – ограничение в применении однофазных схем в устройствах сравнительно большой мощности.

В рассматриваемом варианте характерно то, что устройство управляемого трогания мощных синхронных двигателей используется кратковременно для реализации предпусковой подготовки. В связи с тем, что при известном выпрямленном напряжении ток определяется только активным сопротивлением обмотки, коэффициент эффективности использования схемы с шунтирующим вентилем можно выразить зависимостью:

$$K_3 = \frac{\cos \alpha_0 + \cos \alpha_{u_0}}{\cos \alpha_0 + \cos(\alpha_0 + \lambda)}. \quad (10)$$

Так, в конкретном случае $\alpha_0 = 0$, $\lambda = \frac{2\pi}{3}$, $\hat{E}_y = 4,0$,

а при $\lambda = \frac{5\pi}{6}$, $\hat{E}_y = 9,0$.

Пример показывает, что лишь при наличии шунтирующего вентиля имеются незначительные возможности регулирования тока в обмотках статора синхронного двигателя при питании его от сети с напряжением 0,4 кВ.

Отмеченное указывает на необходимость дополнительного исследования схем с шунтирующим вентилем в применении к трехфазному синхронному двигателю. Использование этой схемы, как и предыдущих, базируется на том, что ток обмоток определяется значением выпрямленного напряжения и активного сопротивления.

Влияние индуктивного сопротивления обмоток невелико. Для сравнения отметим особенности питания обмоток статора переменным напряжением указанного уровня.

Пусть пусковой ток синхронного двигателя при питании от сети 6 кВ превышает номинальный в λ_i раз. Тогда при заторможенном двигателе и питании от сети 0,4 кВ значение тока по отношению к номинальному будет

$$\lambda'_i = \lambda_i \frac{0,4}{6} = 0,067\lambda_i. \quad (11)$$

Это значение тока недостаточно для создания значимого момента двигателя.

Работа в вентильной схеме с шунтирующим вентилем позволяет получить токи в несколько раз выше номинального при отсутствии управления.

Отмеченное выше позволяет сформулировать требования к устройствам электропитания синхронных двигателей при формировании режимов трогания. С учетом отмеченных особенностей можно сформулировать требования, которые должны обеспечивать:

- прямое вращение векторов м.д.с. статора при коммутации шестью тиристорами;
- обратное вращение векторов м.д.с. с шестью коммутациями тиристором;
- обратное вращение векторов с дроблением шага (с двенадцатью коммутациями тиристором одного преобразовательного модуля);
- обратное вращение векторов с дроблением шага (с двенадцатью коммутациями тиристором одного тиристорного модуля);

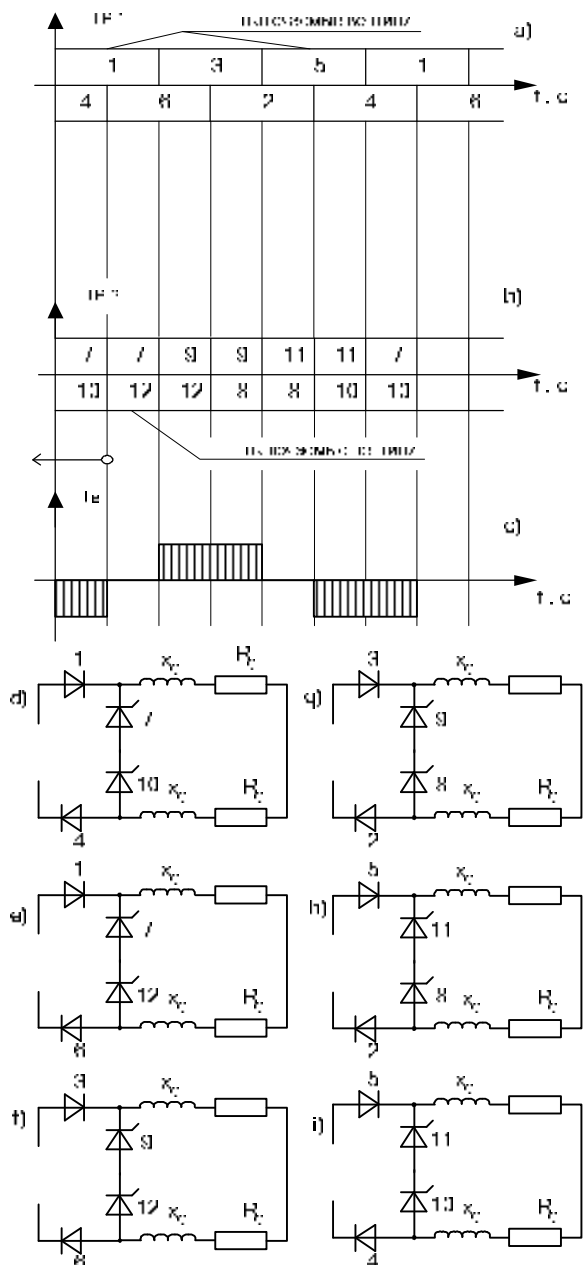


Рисунок 6 – Временные диаграммы включения вентиляей (а, б, в) тиристорного регулятора TP1, схемы коммутации вентиляей (д, е, ф, г, х, и) для прямого вращения векторов м.д.с.

- прямое вращение векторов с шунтирующими вентиляями (с работой двух тиристорных преобразователей) и шестикратной коммутацией;
- обратное вращение векторов с шунтирующими вентиляями (с работой двух тиристорных преобразователей) и шестикратной коммутацией;
- прямое вращение векторов при отсутствии линейного тиристорного преобразователя с шестикратной коммутацией вентиляей;
- обратное вращение векторов при отсутствии линейного тиристорного преобразователя с шестикратной коммутацией вентиляей;

- регулирование максимальных значений м.д.с. на каждом из дискретных положений в соответствии с требованиями режима трогания;
- управление фазой м.д.с. между двумя дискретными смежными положениями для двух комбинаций включенных вентилялей;
- фиксацию положения м.д.с. в заданном положении с нагрузкой на валу запускаемого двигателя.

Диаграммы управления вентилями и схемы включения обмоток двигателя приведены на рис. 6. На основе приведенных диаграмм могут быть реализованы алгоритмы управления вентилями основного и вспомогательного (шунтирующего) преобразователей.

На рис. 7 показаны диаграммы управления вентилями основного преобразователя для реализации прямого и обратного вращения векторов м.д.с. Диаграммы приведены без учета работы шунтирующих вентилялей с целью упрощения общей картины.

Из изложенного видно, что принципиальным, независимым вопросом является вопрос определения регулировочных характеристик по амплитуде и фазе м.д.с. даже при симметрии сопротивлений фаз статора, а также формирования режимов трогания двигателя при заданных значениях тока статора и тока возбуждения. Отдельным вопросом является вопрос определения истинного положения ротора в начальный момент трогания. В этой связи далее уделяется внимание исследованию переходных процессов в системе статорных обмоток двигателя.

Анализ выполнен применительно к синхронному двигателю СДН-13-49-12У3, $P_n=1000$ кВт, $U=6000$ В, $n=300$ об/мин, $I_n=113$ А, $\cos\varphi=1,0$, $R_C=0,4$ Ом, $L_C=0,00468$ Гн, $\tau_C=0,017$ с.

Переходной процесс рассматривается применительно к одновентильной схеме без шунтирующего вентиля, а также с шунтирующим вентилем. Рассматривается квазиустановившийся режим, характерный тем, что при включении сетевого вентиля начальные условия неизменные. Взаимная индуктивность между обмотками статора к ротора при анализе не учитывается.

Зависимости напряжения и тока в силовой цепи для двух вариантов уравнения (без шунтирующего и с шунтирующим вентилем) приведены на рис. 8.

Ток $I(t)$ при отсутствии шунтирующего вентиля определяется так [3, 6, 8, 9]:

$$I(t) = \frac{U_C}{\sqrt{2} \cdot Z_C} \left(\sin(\omega t - j) - \sin(a - j) \cdot e^{-\frac{t-t_a}{\tau}} \right), \quad (12)$$

где при $t > \frac{a}{\omega} = t_a$, $Z_C = \sqrt{R_C^2 + \omega^2 L_C^2}$;

$$j = \arctg \frac{L_C}{R_C}.$$

При шунтировании обмотки статора силовые тиристоры выключаются при $t = 0,01$ с и мощность не возвращается вследствие этого в сеть при $U_C(t) < 0$.

Выражение для тока при наличии

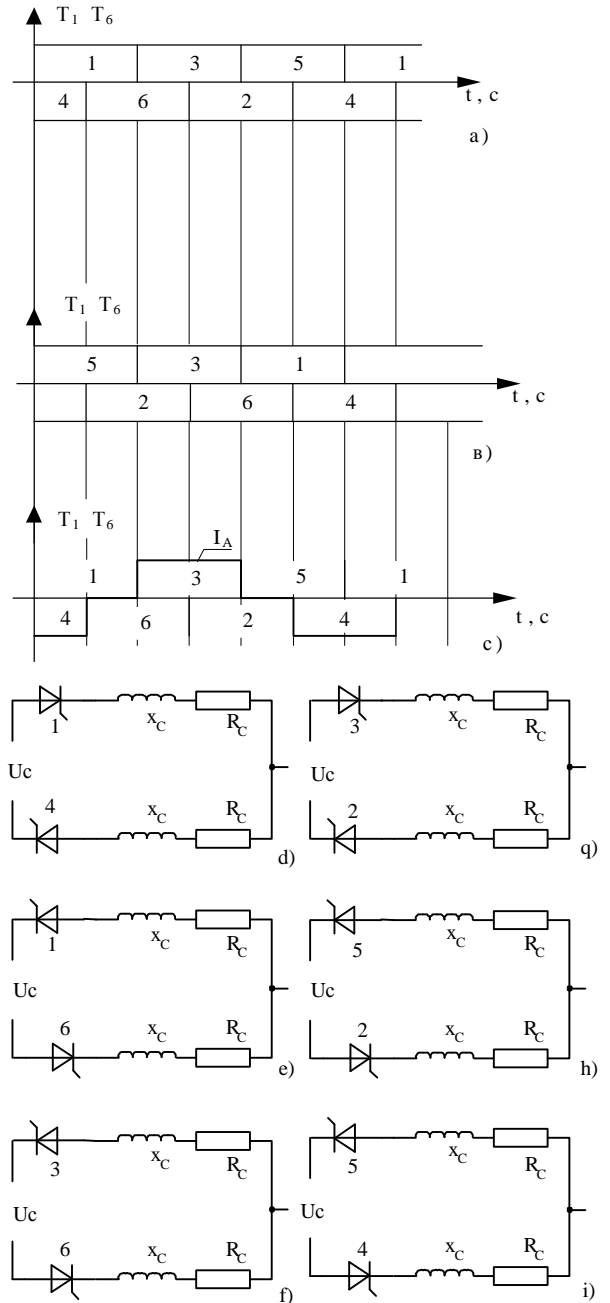


Рисунок 7 – Временные диаграммы включения вентилялей (a, b, c); схемы включения вентилялей (d, e, f, q, h, i)

Это хорошо известное явление приводит к существенному росту выпрямленного напряжения.

В первом случае оно выражается зависимостью:

- при отсутствии шунтирующего вентиля

$$U_d = U_m \frac{1}{T} \int_{t_a}^{t_a+T} \sin(\omega t) dt, \quad (13)$$

- при наличии шунтирующего вентиля.

$$U_d = U_m \frac{1}{T} \int_{t_a}^{T/2} \sin(\omega t) dt. \quad (14)$$

- при решении задачи создании специального

шунтирующего вентиля имеет разные формы в зависимости от анализируемого участка при закрытом (1-й участок) или открытом шунтирующем вентиле (2-й участок):

– при $T \geq t \geq t_a$

$$I(t) = \frac{U_C}{\sqrt{2} \cdot Z_C} \left(\sin(\omega t - j) - \sin(a - j) \cdot e^{-\frac{t-t_a}{\tau}} \right) + I_m \cdot e^{-\frac{T/2+t}{\tau}}, \quad (15)$$

– при $T + t_a \geq t \geq T/2$

$$I(t) = I_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (16)$$

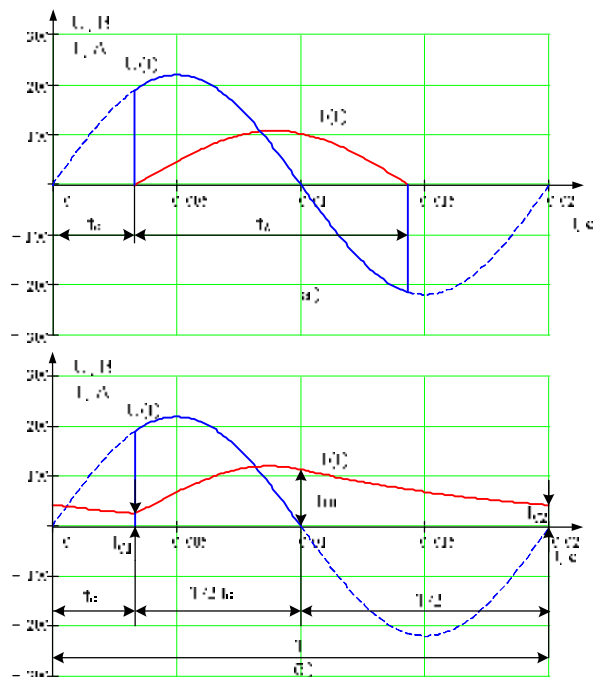


Рисунок 8 – Графики переходных процессов $U(t)$, $I(t)$: а) – при отсутствии шунтирующего вентиля, б) – с шунтирующим вентиляем

Параметр I_m определяется из зависимости для $I(t)$ при $t = T/2$:

$$I_m = \frac{U_C}{\sqrt{2} \cdot Z_C} \left(\sin\left(\omega \frac{T}{2} - j\right) - \sin(a - j) \cdot e^{-\frac{T/2}{\tau}} \right) + I_m \cdot e^{-\frac{T/2}{\tau}}. \quad (17)$$

Выводы. Включение шунтирующих вентиля приводит к следующим положительным результатам:

– ток в обмотках якоря возрастает и становится непрерывным;

– при $x_C \geq (8 \div 10)R_C$ ток в силовой цепи может определяться в соответствии с приближенной зависимостью $I_C = \frac{0,45 \cdot U_C}{2 \cdot R_C}$, причем

действующее значение тока на 8-10 % выше среднего. Это означает, что уровень гармоник момента при реализации процесса трогания невелик;

– при управлении вентилями в трехфазном варианте эффективность шунтовых вентиля повышается;

оборудования для реализации старт-стопных режимов необходимо разработать микропроцессорные устройства и алгоритмы, обеспечивающие реализацию поворота вектора м.д.с. статора с шестью и двенадцатью коммутациями на одном электрическом обороте как с шунтирующим вентиляем, так и без него;

– один из нерешенных вопросов – создание датчиков положения ротора без использования дополнительных механических устройств;

– алгоритм управления устройствами трогания, который необходимо создать, должен включать и вариант реверсного движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробейчик О.С., Величко Т.В. Особенности трогания синхронного двигателя с тиристорным регулятором в цепи статора // Збірник тез. Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації. – Кременчук, 2008. – С. 83.
2. Шенфельд Р., Хабичер Р. Автоматизированные электроприводы. – Л.: Энергоатомиздат, 1996. – 464 с.
3. Иванчук Б.Н., Липман Р.А. Тиристорные усилители постоянного тока. – Л.: Энергия, 1964. – 96 с.
4. Ахматов М.Г. Синхронные машины. Специальный курс. – М.: Высшая школа, 1984. – 135 с.
5. Черный А.П., Луговой А.В., Родькин Д.И., Сисюк Г.Ю., Садовой А.В. Моделирование электромеханических систем: Учебник. – Кременчук, 2001. – 376 с.
6. Такеути Т. Теория и применение вентильных цепей для регулирования двигателей. – Л.: Энергия, 1973. – 247 с.
7. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. Автоматизированные электроприводы в горнорудной промышленности. – М.: Недра, 1975. – 406 с.
8. Зиннер Л.Я., Скороспешкин А.И. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1981. – 135 с.
9. Шубенко В.А., Браставский К.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. – М.: Энергия, 1972. – 200 с.

Стаття надійшла 07.04.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.