

УДК: 622.62-83: 621.33

КВАЗИЧАСТОТНЫЙ ПУСК СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Гладырь А.И., к.т.н., доц., Киба И.И., Воробейчик О.С.

Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского

Юрченко Н.Н., д.т.н., проф.

Институт электродинамики НАН Украины

Сенько В.И., д.т.н., проф.

Национальный технический университет «Киевский политехнический институт»

39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20

E-mail: gai@polytech.poltava.ua

В статті проаналізовані різні способи пуску синхронних двигунів. Розроблена ефективна система пуску синхронних машин.

Ключові слова: квазичастотний пуск, синхронна машина, перетворювач.

In article analytical researches of ways quazi frequency start-up of synchronous machines are given. Parities of the adjustable parameters are determined, allowing to design systems of start-up.

Keywords: quazi frequency start-up, synchronous machine, converter.

Введение. По объемам установленных электрических мощностей, синхронные двигатели занимают доминирующее положение среди других электрических машин в промышленных электроприводах (ЭП). В большинстве промышленных установок и комплексов при наличии ограничений на затраты по применению регулируемого электропривода, пусковые системы приобретают первостепенную важность [1].

К асинхронному пуску электродвигателей предъявляются противоречивые требования: с одной стороны, обеспечение необходимой величины пускового момента, а с другой - снижение пускового тока до допустимой величины. По первому требованию ограничен предел снижения напряжения, в то время как по второму, наоборот, ограничен предел его увеличения.

С целью исключения влияния сверхмощных синхронных двигателей на уровень напряжения питающей сети в периоды их асинхронного пуска в общем случае применяют пуск при пониженном напряжении через: неуправляемый или управляемый дроссель, автотрансформатор, блок трансформатор-двигатель. Относительная простота схемы включения при пуске блок-трансформатор-двигатель не только значительно повышает стоимость установки и увеличивает мощность потерь, но и сводит на нет решающее преимущество синхронных двигателей из-за практической невозможности использования их в качестве компенсирующих устройств в системе заводского электроснабжения. При разгоне механизмов с большими маховыми массами и моментом сопротивления на валу, равным 15-20% от номинального значения, снижение напряжения вызывает, тем не менее, больший перегрев пусковой клетки, чем при пуске от полного напряжения, вследствие

увеличения времени пуска.

По величине подводимого в момент пуска к двигателю напряжения схемы пуска подразделяются на две группы:

- 1) с подачей пониженного напряжения;
- 2) с подачей полного напряжения сети.

Пониженные напряжения в момент пуска применяются для уменьшения пускового тока и связанного с этим падения напряжения в питающей сети или для уменьшения динамических усилий в лобовых частях обмотки статора. Все схемы ограничения токов в момент пуска достаточно громоздки и дороги.

Анализ предыдущих исследований. Указанные в [1] способы пуска не всегда являются приемлемыми по технологическим условиям или из-за большой мощности электродвигателя. В связи с этим для пуска мощных СД могут применяться следующие схемы пуска:

- включение активных и реактивных элементов в статорную цепь;
- пуск асинхронных двигателей с помощью регулятора напряжения в цепи статора;
- частотный пуск синхронных двигателей с помощью электромашинного преобразователя частоты;
- асинхронно-частотный пуск;
- пуск с управлением по цепи возбуждения;
- пуск с помощью вспомогательного разгонного двигателя.

Выбор способа пуска СД определяется следующими условиями:

- снижение напряжения в сети при пуске двигателя не должно влиять на нормальную работу присоединенных к той же сети потребителей. В соответствии с СН 174-75 снижение напряжения

при пуске на шинах 6-10 кВ источника питания не должно превышать 10-15% от номинального при питании осветительной и смешанной нагрузок и 20-25% - при питании чисто силовой нагрузки (25% допускается при редких пусках - один раз в смену);

- перегрузка трансформаторов пусковыми токами не должна превышать определенного наперед заданного значения, зависящего от числа пусков в сутки и их длительности.

В настоящее время существуют различные схемные решения проблемы пуска высоковольтных двигателей, реализующие наиболее целесообразные методы: прямого пуска; пуска с помощью вспомогательных машин и механизмов; пуска с использованием средств, изменяющих параметры электроэнергии (источника питания).

Рассматривая вопрос обоснования целесообразности применения пусковых систем, определения их расчетных параметров и возможного получаемого эффекта, следует исходить из возможностей систем и требований, выполнение которых обязательно при использовании технического решения в конкретных условиях [1, 2].

Классическая схема реакторного пускового устройства не требует анализа, хотя следует отметить то, что она позволяет достаточно просто осуществить снижение пусковых токов и мощности, т. е. явно обеспечивает облегченный запуск, снижение ускорения при разгоне (рис. 1,а)). Трансформаторная система применяется существенно реже, характеризуется большей сложностью, однако, при использовании тиристорных регуляторов на стороне пониженного напряжения обеспечивает плавное регулирование напряжения на статоре двигателя Д (рис. 1, б)). Если вторичную цепь трансформатора связать с соответствующей сетью, то может быть реализован режим повышения напряжения на зажимах статора. Таким образом, рассмотренный вариант позволяет осуществить трогание запускаемого двигателя с повышенным пусковым моментом. На рис. 1, б) представлена схема тиристорного пускового устройства с регулятором ТР, широко используемого в технике.

Регулирование угла управления $\alpha(t)$ позволяет управлять напряжением на зажимах статора двигателя, формировать практически любые пусковые характеристики двигателя (токовые и механические) с уменьшением их значений по сравнению с естественной схемой включения. Специальные режимы: получение пониженных скоростей $(0.05 - 0.1)\omega_{ном}$, формирование пусковых характеристик с повышенным пусковым моментом, возможны при использовании квазичастотного управления. Негативная сторона такого управления - повышенные токовые нагрузки и генерирование в сеть широкого спектра гармоник тока, исключает возможность использования режимов в сетях 6 кВ для запуска мощных двигателей.

Все многообразие пусковых устройств для синхронных и асинхронных двигателей не исчерпывается схемными вариантами, представленными на рис. 1.

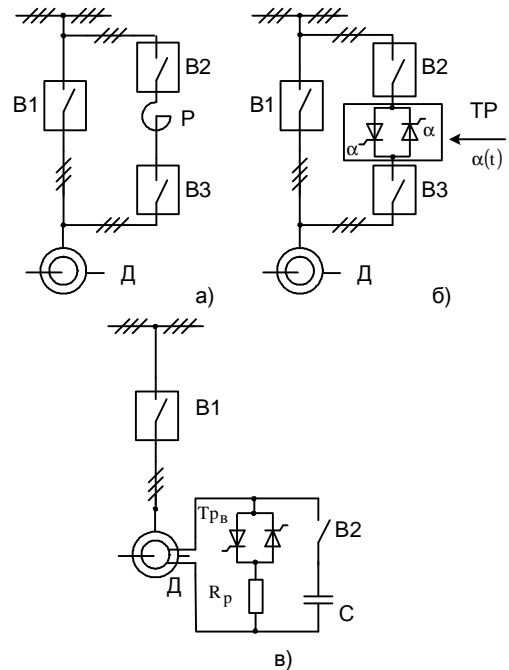


Рисунок 1 – Схемные варианты высоковольтных пусковых систем

Цель работы – разработка высокоэффективной системы квазичастотного пуска СД.

Материал и результаты исследования. При исследовании режима пуска СД примем следующие допущения: ротор имеет демпферную обмотку с параметрами X_{D1}, R_D (составляющие X_{D1}, R_D – в продольной оси, X_{q1}, R_q – в поперечной оси); в продольной оси ротора размещена обмотка возбуждения, к которой подключен внешний резистор RR .

На рис. 2 приведена полная (а) и упрощенная (б) схемы замещения СД для статорной системы координат.

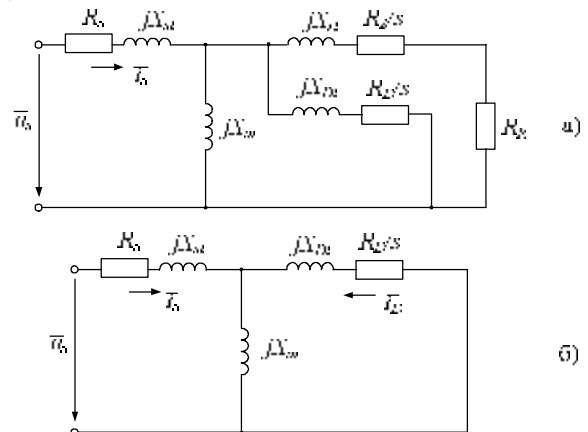


Рисунок 1 – Схемы замещения СМ полная (а) и упрощенная (б) для статорной системы координат

Учитывая, что внешнее сопротивление R_R на порядок больше активного сопротивления обмотки возбуждения R_r СМ и, тем более, активного сопротивления демпферной обмотки R_D , а также то, что индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения X_{rl} превосходит индуктивное сопротивление демпферной обмотки X_{Dl} , из полной схемы замещения СМ по рис. 1, а) можно исключить цепь $(jX_{rl} + \frac{R_r}{s} + R_r)$.

Из рис. 2, б) видно, что схема замещения СД при пуске идентична схеме замещения АД с короткозамкнутым ротором и для ее анализа могут быть использованы результаты исследований АД [3, 4]. Тогда для эффективного использования двигателя в процессе трогания и пуска может быть использован закон постоянства перегрузочной способности $U_s / f_s = \text{const}$, или с коррекцией напряжения при малых частотах $E_s / f_s = \text{const}$, при этом ток статора остается примерно постоянным $I_s \approx \text{const}$. Выполнение условия изменения напряжения и частоты

при пуске может быть обеспечено применением фазорегулятора.

На рис. 3 приведен вариант трехфазного фазорегулятора, который может быть использован для квазичастотного пуска СД [1, 5].

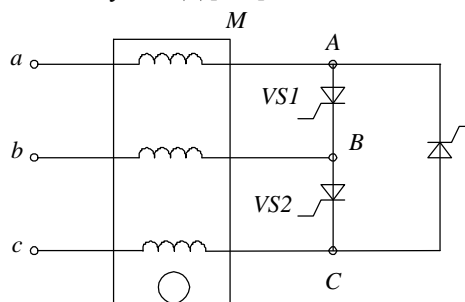


Рисунок 3 – Принципиальная схема трехфазного фазорегулятора

Работу однофазного фазорегулятора иллюстрируют диаграммы напряжения на входе и выходе. Выходное напряжение u_m заданной частоты f_m набирается из полувольт входного напряжения u_G частотой f_G (рис. 4).

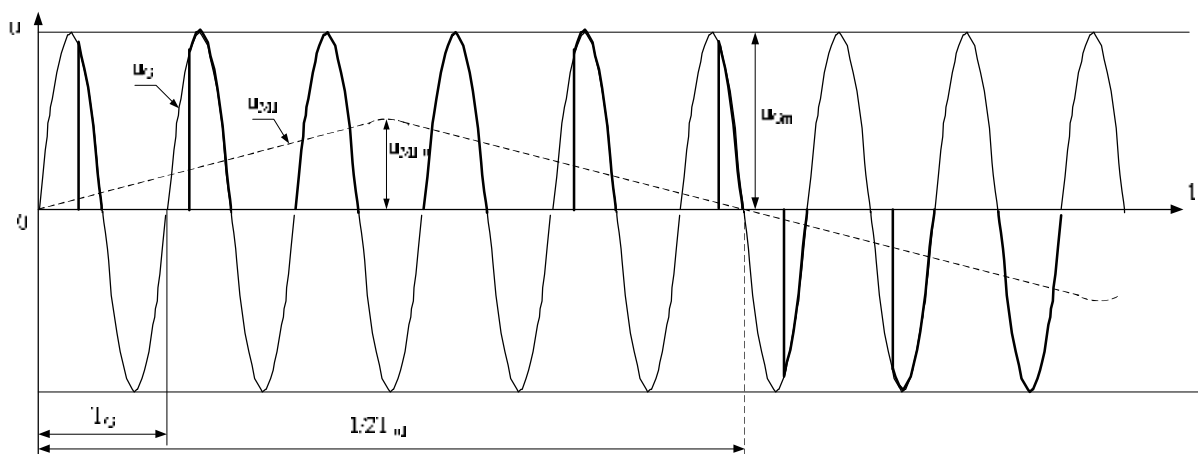


Рисунок 4 – Идеализированные диаграммы напряжений однофазного регулятора при $T_M = 11 T_G$, $f_M = f_G / 11 = 50 / 11 = 4.5$ Гц

Положительная полуволна напряжения u_m образуется при включении тиристора VS1, отрицательная полуволна – при включении тиристора VS2. Отключение тиристорov происходит естественным путем в результате приложения к ним обратного напряжения u_{m1} – первая гармоника модулированного напряжения. Периоды $T_M = 1/f_M$ выходного напряжения u_m при пуске нарастают дискретно с шагом в один период $T_G = 1/f_G$ выходного напряжения u_G . При этом каждой дискретной частоте f_{mi} соответствует величина напряжения u_{mi} по регулировочной характеристике $U_M = f(f_M)$. Отсюда название – квазичастотное регулирование. В диапазоне низких выходных частот шаг

$\Delta f_{Mi} = (f_{M(i+1)} - f_{Mi})$ составляет доли и единицы герц. Соответственно невелико и пошаговое наращивание величины напряжения. Однако, на последних шагах перед выходом на синхронную частоту $f_M = f_G$ частота f_{mi} принимает значения: $50/4 = 12.5$ Гц; $50/3 = 16.7$ Гц; $50/2 = 25$ Гц; $50/1 = 50$ Гц.

В последнем случае оба тиристора VS1 и VS2 включены постоянно и могут быть закорочены контактором, по аналогии с реакторным пуском.

Между фиксированными частотами f_{Mi} и $f_{M(i+1)}$ при очередном шаге происходят переходные процессы с нарастанием амплитуды токов и момента, максимальное значение которых в однофазной

системе имеет место на последнем шаге при переключении фазорегулятора с частоты 25 Гц на 50 Гц. Но это максимумы меньше, чем при прямом пуске. В этом основное достоинство квазичастотного регулирования.

На предпоследней ступени перед входом на номинальную частоту $\omega_{\text{НОМ}}$ в установившемся режиме фазорегулятор задает $\omega_s = 0.5\omega_{\text{НОМ}} = \text{const}$, $U_s = 0.5U_{\text{НОМ}} = \text{const}$, $I_s \approx \text{const}$, $s \approx 0.05$.

Переключение с частоты $\omega_s = 0.5\omega_{\text{НОМ}}$ на номинальную частоту на последней ступени $\omega_s = 1.0\omega_{\text{НОМ}}$ происходит с изменением величины напряжения двигателя с уровня $U_{M1} = U_s = 0.5U_{\text{НОМ}}$ на уровень $U_{M1\text{НОМ}} = U_{\text{НОМ}}$. Начальным условием в момент перехода частот яв-

ляется наличие в двигателе тока $i_s(0)$. Величина начального тока определяется моментом переключения частот.

Если при прямом пуске подключение двигателя под напряжение происходит в произвольный момент времени, то при квазичастотном регулировании момент переключения может быть жестко задан фазорегулятором таким образом, чтобы отклонение переходного тока от установившегося значения было минимальным. Для определения момента наиболее благоприятного для корректирования частот рассмотрим вначале состояние фазорегулятора и диаграммы токов и напряжений на частоте $0.5\omega_{\text{НОМ}}$, а затем при переходе на частоту $1.0\omega_{\text{НОМ}}$, рис. 5.

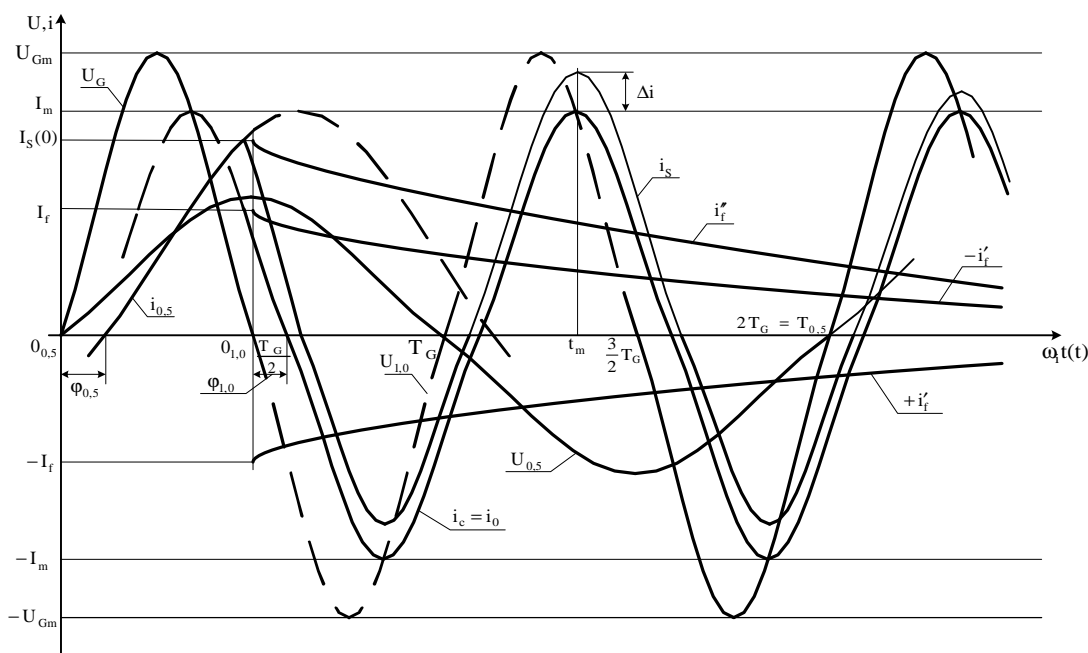


Рисунок 5 – Диаграммы токов и напряжений при переключении фазорегулятора с частоты $0.5\omega_{\text{НОМ}}$ на частоту $1.0\omega_{\text{НОМ}}$ первой гармоники выходного напряжения

Введем ряд обозначений. Пусть входные параметры будут иметь индекс «G», а параметры задаваемые фазорегулятором на предпоследней ступени регулирования в установившемся режим - индекс «0.5», на последней ступени регулирования в установившемся режиме – индекс «1.0». Тогда u_G – мгновенное значение напряжения питающей сети; U_{Gm} – амплитуда питающего напряжения; ω_G – циклическая частота питающего напряжения; T_G – период питающего напряжения, $\omega_G T_G = 2\pi$; $\omega_{0.5} = 0.5\omega_{\text{НОМ}} = 0.5\omega_G$ – циклическая частота первой гармоники напряжения на выходе фазорегулятора; $T_{0.5} = 2T_G$ – период первой гармоники модулированного напряжения; $u_{0.5} = u_{M1} = u_s$ – мгновенное значение первой гармоники модулированно-

го напряжения на выходе фазорегулятора; $\omega_{0.5} T_{0.5} = 2\pi$; $U_{0.5} = U_{M1m} = U_{sm}$ – амплитуда синусоиды $u_{0.5}$; $i_{0.5} = I_m \cdot \sin(\omega_{0.5}t - \phi_{0.5})$ – мгновенное значение тока двигателя; $I_m = I_{m0.5} = I_{sm} = \frac{U_{sm} 0.5}{Z_{\Sigma 0.5}} = \text{const}$ – амплитуда тока двигателя; $0_{0.5}$ - начало координат для процессов на предпоследней ступени; $\omega_{1.0} = 1.0\omega_{\text{НОМ}} = \omega_G$ – циклическая частота напряжения; $T_{1.0} = T_G$ – период напряжения; $\omega_{1.0} T_{1.0} = 2\pi$; $u_{1.0} = u_{\text{НОМ}} = u_G$ – мгновенное значение; $U_{1.0} = U_{\text{НОМ}} = U_{Gm}$ – амплитуда напряжения; $i_{1.0} = I_m \cdot \sin(\omega_{1.0}t - \phi_{1.0})$ – мгновенное значение тока двигателя;

$$I_m = I_{m1.0} = I_{sm} = \frac{U_{sm1.0}}{Z_{\Sigma 1.0}} = \text{const} - \text{амплитуда тока}$$

двигателя; $0_{1.0}$ - начало координат для процессов перехода на предпоследнюю ступень регулирования.

Переходной процесс начинается в момент $t = 0_{1.0}$ с начального тока $i_s(0)$:

$$i_s(0) = i_{0.5} \left(t = \frac{T_{0.5}}{4} \right) = I_m \cdot \sin \left(\omega_{0.5} \frac{T_{0.5}}{4} - \varphi_{0.5} \right) = I_m \cos \varphi_{0.5}. \quad (1)$$

Частота вращения ротора ω_R изменяется от $\sim \omega_{0.5}$ при $t = 0_{1.0}$ до $\sim \omega_{1.0}$ в установившемся режиме, соответственно скольжение изменяется от $s = 0.5$ до $s \approx 0.05$.

Эквивалентные параметры схемы замещения запишем в виде:

$$R_{\Sigma} = R_s + \frac{R_D \cdot X_m^2}{s \left(\left(\frac{R_D}{s} \right)^2 + x^2_{Dm} \right)}; \quad (2)$$

$$X_{\Sigma} = X_{sl} + \frac{\left(\frac{R_D}{s} \right)^2 + x_{DC} \cdot x_{Dm}}{\left(\frac{R_D}{s} \right)^2 + x^2_{Dm}} \cdot x_m; \quad (3)$$

$$X_{Dm} = X_m + X_{Dl}; \quad (4)$$

$$Z_{\Sigma} = |\bar{Z}_{\Sigma}| = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + x^2_{\Sigma}}; \quad (5)$$

$$I_{sm} = \frac{U_{sm}}{Z_{\Sigma}}; \quad (6)$$

$$\varphi = \arctg \frac{w_s L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}; \quad (7)$$

$$\tau = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}. \quad (8)$$

Для определения исходных параметров на предпоследней ступени в установившемся режиме в выражения (1)-(8) необходимо подставить значения $\omega_{0.5}$ и $s \approx 0.05$. Для определения конечных параметров на последней ступени в установившемся режиме в выражения (2)-(8) необходимо подставить значения $\omega_{1.0}$ и $s \approx 0.05$.

Переходной ток:

$$i_s = i_c + i'_f + i''_f = -I_m \sin(\omega_{0.1} t - \varphi_{1.0}) - I_m \sin \varphi_{1.0} \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1.0}} \right) + I_m \cos \varphi_{0.5} \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1.0}} \right) \quad (9)$$

Вынужденная составляющая переходного тока:

$$i_c = -I_m \sin(\omega_{1.0} t - \varphi_{1.0}). \quad (10)$$

Свободные составляющие переходного тока:

$$i'_f = -I_f \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1.0}} \right) = -I_m \sin \varphi_{1.0} \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1.0}} \right), \quad (11)$$

$$i''_f = i_s(0) \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1.0}} \right) = I_m \cos \varphi_{0.5} \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1.0}} \right), \quad (12)$$

где $I_f = i_c(t = 0_{1.0}) = -I_m \cdot \sin(\varphi_{1.0}) = I_m \cdot \sin(\varphi_{1.0})$, а $i_c(0)$ определяет выражением (1).

Принятый на рис. 4 момент перехода фазорегулятора с частоты $\omega_{0.5} = 0.5\omega_{\text{шном}}$ на частоту $\omega_{1.0} = 1.0\omega_{\text{шном}}$ при $t = \frac{T_G}{2}$ является оптимальным.

Действительно, на интервале $[0_{0.5} \dots \varphi_{0.5}]$ включен тиристор VS2, который проводит индуктивный ток нагрузки $-i_{0.5}$. На этом же интервале может быть включен и тиристор VS1, но он не будет проводить тока, поскольку находится под действием падения напряжения на тиристоре VS2, приложенного к VS1 в обратном направлении. Далее при $\omega_{0.5} \cdot t \geq \varphi_{0.5}$ ток в нагрузке меняет направление, в тиристоре VS2 ток спадает до нуля, а тиристор VS1 набирает ток нагрузки и проводит его в течение времени $> \frac{T_G}{2}$.

Таким образом, по крайней мере, на интервале $[0_{0.5} \dots \geq \frac{T_G}{2}]$ фазорегулятор фактически неуправляем. Управляемость фазорегулятора восстанавливается при $t > \frac{T_G}{2}$, но тогда увеличивается начальное значение свободной составляющей i'_f , за счет увеличения $i_s(0)$, и уменьшается начальное значение свободной составляющей i''_f , в итоге увеличивается суммарная свободная составляющая переходного тока, что ведет к росту амплитуды переходного тока по сравнению с рассмотренным случаем.

Вывод: оптимальное переключение фазорегулятора с частоты $\omega_{0.5}$ на частоту $\omega_{1.0}$ происходит автоматически, когда на предпоследней ступени квазичастотного регулирования при любом включенном тиристоре в фазорегуляторе включается тиристор, соединенный с ним встречно-параллельно.

Данный вывод верен и для трехфазной схемы фазорегулятора. Максимальное значение превышения переходного тока i_s над установившимся i_c составляет в однофазной системе:

$$\Delta i = i''_f(t_m) - i'_f(t_m) = I_m (\cos \varphi_{0.5} - \sin \varphi_{1.0}) \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1.0}} \right), \quad (13)$$

где

$$t_m = \frac{3}{4} T_G + \varphi_{1.0}. \quad (14)$$

Практические расчеты дают $\Delta i < 0.25 I_m$.

По сравнению с однофазной схемой в трехфазной системе «фазорегулятор-синхронная машина»

весьма проблематично реализовать предпоследние ступени частоты $(0.25-0.5)\omega_{\text{НОМ}}$ из-за невозможности формирования симметричных кривых выходных напряжений фазорегулятора одновременно с необходимостью обеспечивать фазовый сдвиг $\frac{2\pi}{3}$

между напряжением обмоток СД. Более-менее приемлема в качестве предпоследней ступень с $\omega_{0.25} = 0.25\omega_{1.0} = 0.25\omega_{\text{НОМ}}$, однако, со значительно искаженной формой выходного напряжения фазорегулятора, рис. 6.

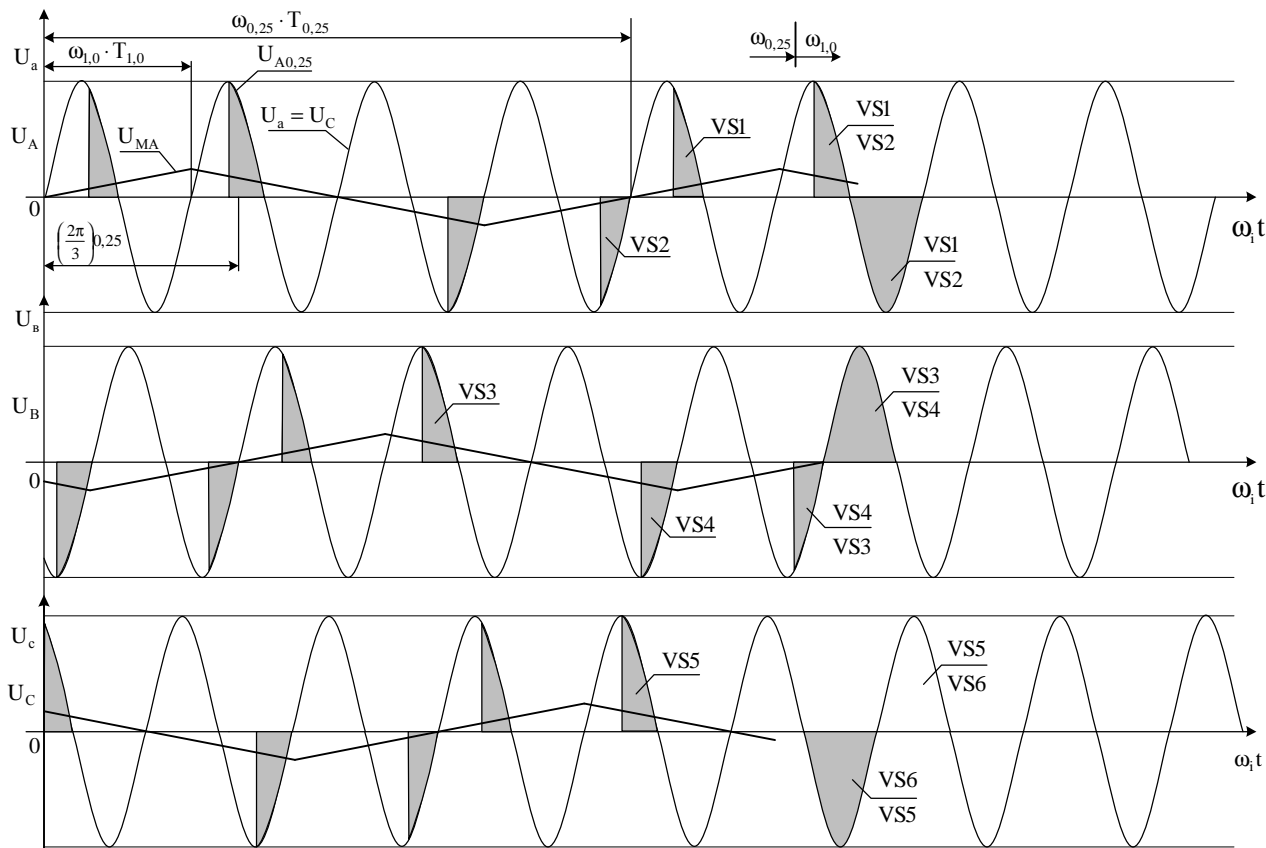


Рисунок 6 – Диаграммы напряжений на входе и выходе трехфазного фазорегулятора при работе на активную нагрузку на частоте $\omega_{0.25} = 0.25\omega_{\text{НОМ}}$ и $\omega_{\text{НОМ}}$

Момент перехода с частоты $\omega_{0.25}$ на частоту $\omega_{1.0}$ в трехфазной системе выбирают, как в однофазной системе. В качестве примера на рис. 6 показаны включения тиристоров фазорегулятора на частотах $\omega_{0.25}$ и $\omega_{1.0}$ и в момент переключения частот.

Выводы. Исследования показали, что при квази-частотном регулировании фазорегулятор жестко задает напряжение $U_{0.25} = 0.25U_G$ на предпоследней ступени частоты $\omega_{0.25} = 0.25\omega_{\text{НОМ}}$. Скольжение при этом устанавливается $s \approx 0.05$. Переход на последнюю ступень частоты $1.0\omega_{1.0} = \omega_{\text{НОМ}}$ с напряжением $U_{1.0} = U_G$ равносителен ступенчатому увеличению напряжения на двигателе до $0.75U_G$. При этом провал вращающего момента примерно будет составлять:

$$\Delta m_{D0} \equiv (0.75U_G)^2 = 0.56U_G^2,$$

т.е. почти вдвое меньше, чем при прямом пуске.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
2. Ковач К.П., Рац Ч. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер.с нем. А.А.Дартау и В.А. Щедровича под ред. А.И. Вольдека. М–Л. «Госэнергоиздат», 1963, 744 с.
3. Павлюк К., Беднарек С. Пуск и асинхронные режимы синхронных двигателей. Пер. с польск. А.Д. Плитмана. М. «Энергия», 1971, 271 с.
4. Асанбаев В.Н. и др. Исследование пусковых характеристик мощного двухполусного синхронного двигателя. К. ИЭД, 1988 44 с. (АН УССР. Ин-т электродинамики; Препр. - 550).
5. Мэрфи Дж. Тиристорное управление двигателями переменного тока. Пер. с англ. Ю.В. Рожанковского. М. «Энергия», 1979, 254 с.

Стаття надійшла 7.08.2008 р.