

УДК 621.314+621.313.323

к.т.н. Калюжный С.В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ТОКОПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Описывается оригинальная силовая схема вентильного электропривода с параметрическим источником тока и гибридным коммутатором, включающим в себя элементы автономных инверторов тока и напряжения.

**Ключевые слова:** электропривод, синхронный двигатель, вентильный коммутатор, автономный инвертор тока, автономный инвертор напряжения.

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Современные жесткие требования автоматизированного электропривода (ЭП) и электроэнергетики в большинстве случаев не могут быть реализованы при использовании электрических машин с традиционным механическим коллектором. Большая окружная скорость коллектора и, как следствие, высокие значения реактивной ЭДС, ограничения перегрузочной способности по току якоря и по скорости его изменения, сильная вибрация и быстрый износ щеток не позволяют значительно поднять предельную мощность машин постоянного тока, особенно при частотах вращения более 3600 об/мин [1].

Достижения современной преобразовательной техники делают актуальным вопрос замены механического коммутатора (коллектора) статическим вентильным, что позволяет, как известно, получить качественный регулируемый ЭП, подобный широко известному приводу постоянного тока, но с применением не электрической машины постоянного тока, а высоконадежной машины переменного тока – синхронной. Такой ЭП называется *вентильным*.

Все известные вентильные коммутаторы строят по разнообразным схемам *инверторов ведомых машин* с применением электронных ключей с управлением только на включение – обычных (однооперационных) тиристоров, либо с применением ключей полностью управляемых – тиристоров запираемых или разных типов транзисторов (в том числе IGBT).

Инверторная часть схемы может выполняться, как правило, в базисе автономного

инвертора тока (АИТ) или напряжения (АИН). Может применяться также для тихоходного вентильного привода непосредственный преобразователь частоты (НПЧ) с трехфазным выходом (в каждую фазу статора синхронного двигателя включают два тиристорных моста, соединенных встречно-параллельно и работающих в выпрямительном-инверторном ведомых сетью режимах).

Одним из обязательных блоков любого известного вентильного электропривода (ВЭП) является позиционный датчик положения ротора (ДПР), принцип действия которого может быть механическим, электромагнитным, емкостным или с использованием эффекта Холла. Датчик даёт информацию для системы управления ключами инвертора (коммутатора) о моментах времени и последовательности их включения/отключения. Благодаря этому обеспечивается ориентирование результирующего вектора тока якоря и, как следствие, вектора магнитного потока относительно полюсов индуктора в соответствии с требованиями по управлению двигателем.

Основываясь на теории работы вентильного двигателя следует отметить, что система управления ключами формирует коммутацию последних таким образом, чтобы вектор магнитного поля якорных обмоток всегда был сдвинут в пространстве относительно вектора потока ротора на угол, близкий до 90°. Регулируя величину тока в якорных обмотках за счет изменения напряжения источника питания амплитудным методом или с помощью ШИМ-модуляции, можно изменять величину вектора якорного потока, а следовательно, и момент ВЭП [1]

$$M = C \cdot \Phi_{\text{я}} \cdot \Phi_{\text{р}} \cdot \sin \Psi, \quad (1)$$

где  $C$  – конструктивная постоянная дв-ля;

$\Phi_{\text{я}}$  – магнитный поток якоря (статора);

$\Phi_{\text{р}}$  – магнитный поток ротора;

$\Psi$  – угол между векторами потоков.

Углом  $\Psi$  определяется знак момента, который действует на ротор синхронной машины, чем определяется направление её вращения.

Для случая стандартных синхронных машин с трехфазной обмоткой статора, тактов коммутации силовых ключей будет всего 6, поэтому вектор потока якоря (статора) будет перемещаться в пространстве «рывками» по 60 эл. град. Это значит, что реальный угол между векторами потоков будет составлять не 90 эл. град., а будет изменяться в диапазоне 60–120 эл. град. при вращении ротора, на который действует переменная нагрузка.

Электромагнитный момент стремится развернуть ротор так, чтобы магнитные потоки статора и ротора совпали, однако как только последний повернется, под действием ДПР происходит новое переключение обмоток статора, и его поток «рывком» перемещается на последующий шаг, «увлекая» за собой поток ротора. При этом в двигательном режиме магнитный поток статора пространственно опережает поток ротора, а в тормозном – наоборот.

Описанная выше теория работы ВЭП касается его работы с инверторным коммутатором напряжения. В случае применения коммутатора тока, для стабилизации последнего в фазах статора, нет необходимости изменять по сигналу от ДПР с помощью ШИМ-модуляции напряжение на входе коммутатора. С этой задачей источник тока может справиться самостоятельно, что является аксиомой его работы. Однако, в действительности, реальных источников тока нет, а при построении источников «токового» питания, практически всегда используют какую-либо схему преобразователя напряжения с достаточно мощной индуктивностью фильтра и глубокой обратной связью по выходному постоянному току. Такая конструкция источника питания является

очень далёкой до «токового» режима, а поэтому все равно требует при построении системы управления ключами коммутатора ВЭП наличия обратной связи по углу поворота ротора.

**Постановка задачи.** Целью настоящей статьи является показать возможность построения ВЭП с коммутатором, работающим в режиме инвертора тока, но с упрощенной системой управления – без обратных связей по току и положению ротора.

**Изложение материала и его результаты.** Решение указанной задачи возможно при использовании в качестве источника питания привода простого по конструкции и обладающего высокой эксплуатационной надежностью параметрического источника тока (ПИТ) с диодным выпрямителем на выходе. В связи с этим, предлагается называть указанную новую схемотехническую разработку привода на базе стандартного синхронного двигателя, как *токопараметрический вентильный ЭП (ТПВЭП)*.

На рисунке 1 приведена схема модели в среде *Matlab/Simulink* одного из вариантов силовой схемы тиристорного ТПВЭП, в основе работы которой лежит схема АИТ со 120-градусным углом проводимости тиристоров. Схема является гибридной, так как имеет некоторые особенности, присущие как схеме АИТ, так и схеме АИН. Коммутирующие конденсаторы  $C1 \div C6$  и отсекающие диоды  $VD1 \div VD6$  являются элементами схемы АИТ, а конденсатор  $C0$  совместно с мостовым обратным выпрямителем *6-pulse diode bridge 1*, предназначенные для свободного обмена реактивной энергии накапливаемой в фазах нагрузки (двигателя), относятся к схеме АИН. Небольшая индуктивность  $L_d$  ограничивает проникновение коммутационных процессов, протекающих в схеме тиристорного коммутатора, непосредственно в схему ПИТ. Для включения тиристоров  $VS1 \div VS6$  используется следящий за анодным напряжением того или иного тиристора принцип формирования сигнала управления [3]. На схеме модели для этого используются модули *Subsystem 1 \div Subsystem 6*, включенные параллельно каждому тиристорному.

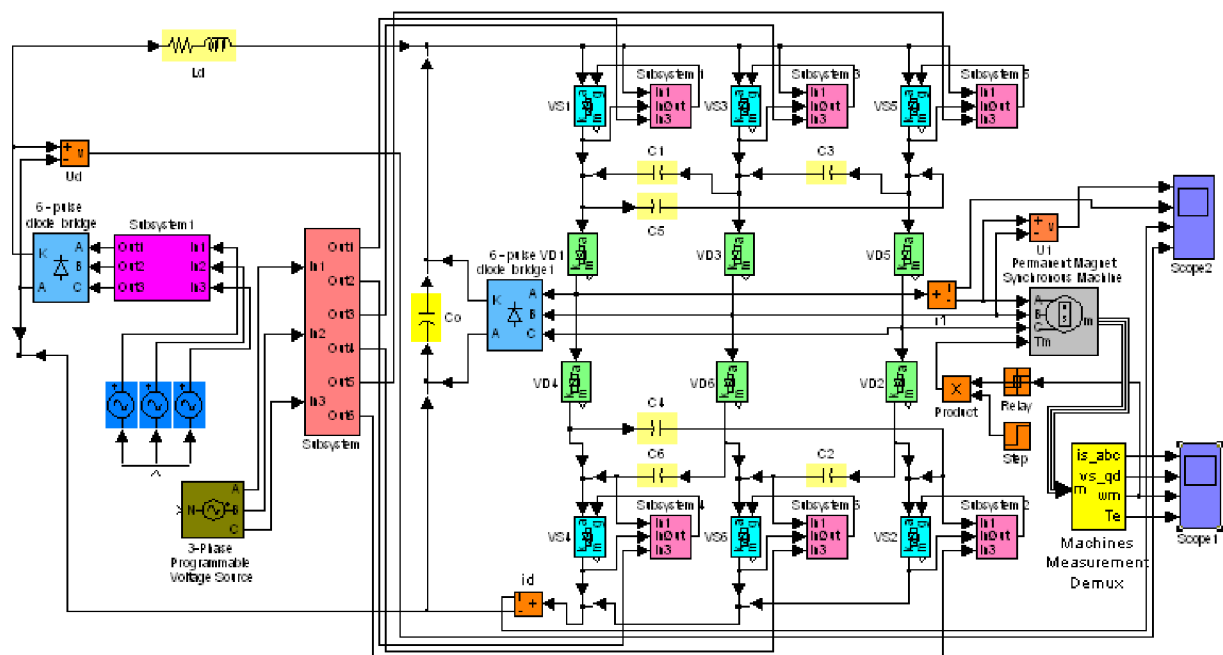


Рисунок 1 – Схема модели ТПВЭП с тиристорным коммутатором

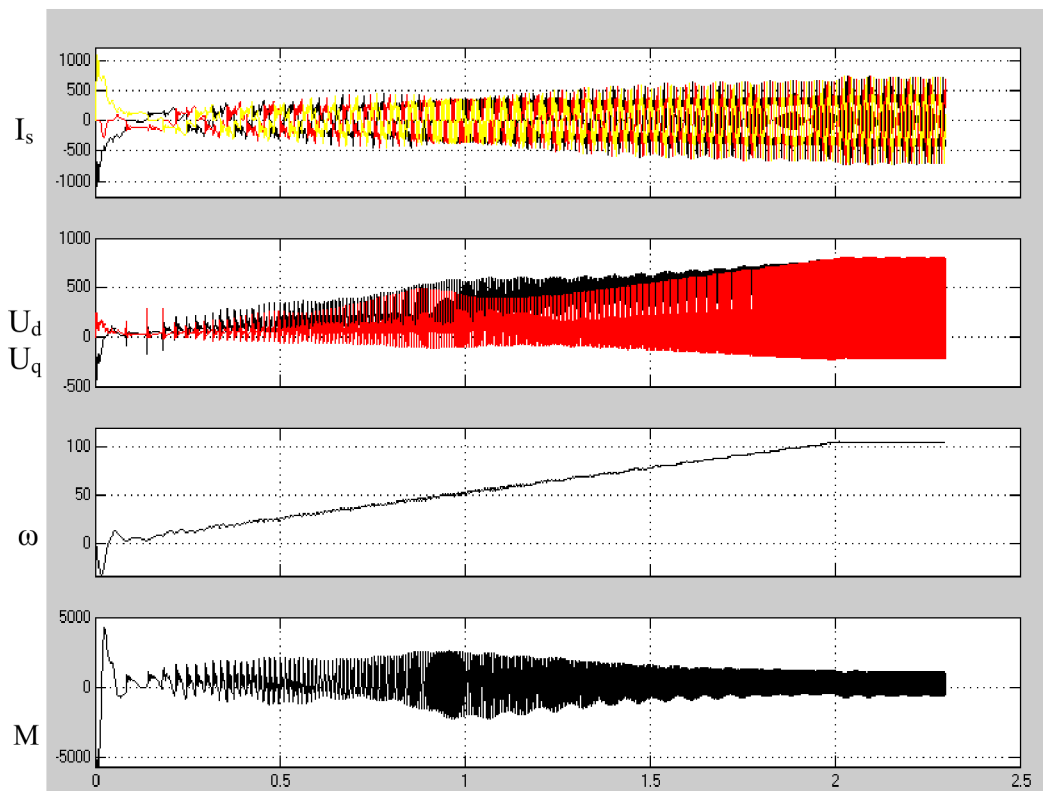


Рисунок 2 – Электромеханические процессы при пуске ТПВЭП с тиристорным коммутатором и обратным выпрямителем при равноускоренном частотно-токовом управлении

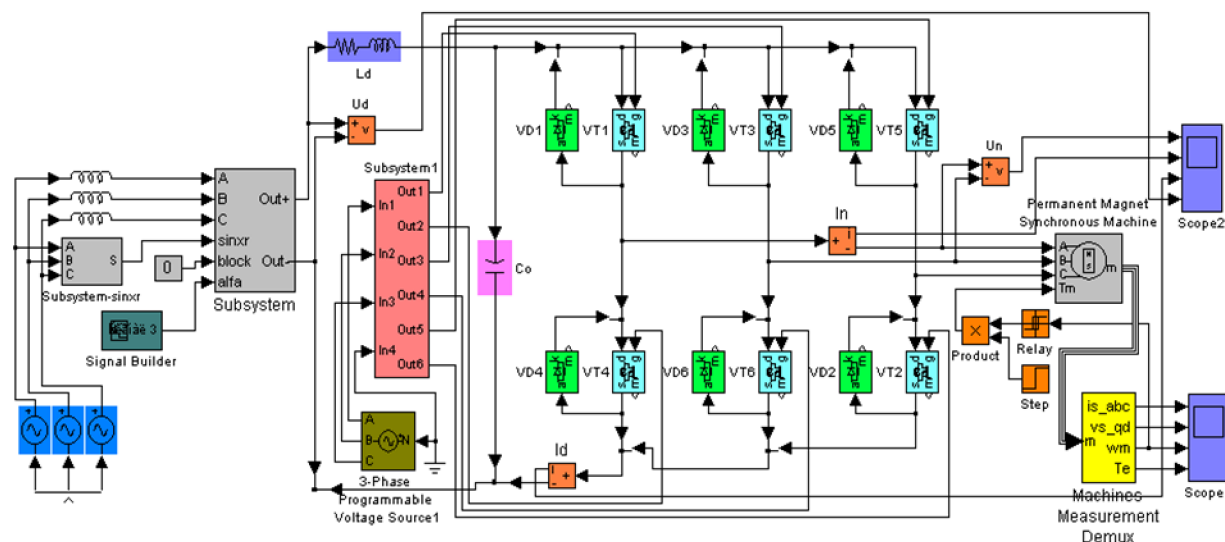


Рисунок 3 – Схема модели ВЭП с транзисторным коммутатором, получающим питание от тиристорного преобразователя с LC-фильтром на выходе

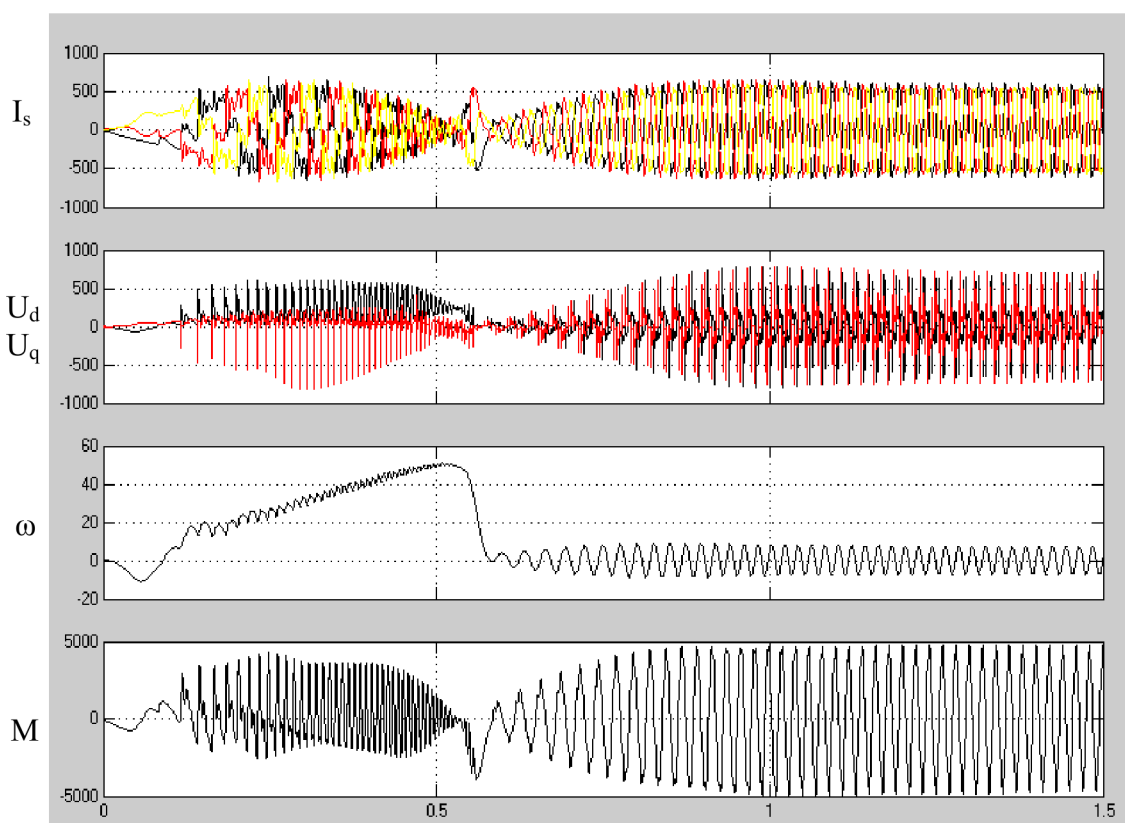


Рисунок 4 – Электромеханические процессы при пуске ВЭП с транзисторным коммутатором по схеме АИН при равноускоренном частотном управлении

Импульс управления тиристором формируется при наличии на аноде положительного потенциала и удерживается столько времени, сколько тиристорю необ-

ходимо для полного и надежного открывания. Это позволяет минимизировать мощность управления и исключает нежелательные, в большинстве случаев, режимы раз-

рывных токов, которые возможны при управлении узкими импульсами.

Для моделирования момента нагрузочно-го реактивного вида, приведенного к валу двигателя, в схеме модели используются три блока: «*Product1*», «*Relay1*», а также блок «*Step*». Частота выходного напряжения АИТ плавно и равномерно регулируется от 0 до 50 Гц при помощи трехфазного генератора «*3-Phase Programmable Voltage Source*», воздействующего на блок «*Subsystem*» системы управления инвертором.

Схема собственно ПИТ свернута в модели в отдельный subsystemный блок и содержит трехфазный реактор и три конденсатора переменного тока. Применение в схеме ТПВЭП большой индуктивности в цепи переменного тока, а не в цепи постоянного тока, как это делается в схемах традиционных АИТ, существенно уменьшает её массо-габаритные показатели. Присутствие конденсаторов значительной емкости в схеме ПИТ дает возможность получить существенной величины форсировки тока, что достаточно хорошо приближает данный вид источника токового питания к идеально-теоретическому.

В схеме (рисунок 1) отсутствует обратная связь по углу поворота ротора двигателя, так как нет ДПР, однако наблюдается абсолютно устойчивый режим пуска и последующая установившаяся скорость (см. рисунок 2). Моделирование ВЭП с теми же параметрами двигателя и нагрузки (рисунок 3), но с использованием вместо ПИТ регулируемого источника постоянного напряжения (тиристорного преобразова-

теля с LC-фильтром на выходе), показывает отсутствие устойчивого пуска синхронного двигателя. Уже при половинной скорости двигатель выпадает из синхронизма (рисунок 4). Для регулирования напряжения на выходе тиристорного преобразователя, питающего наиболее распространенный тип транзисторного коммутатора по схеме АИН, в схеме модели рисунок 3 применяется блок «*Signal Builder*».

Как указывалось выше, нормальная работа такого ВЭП возможна при наличии, как минимум, двух обратных связей:

1) по постоянному току на входе транзисторного коммутатора, чтобы не перегружать по току обмотку статора двигателя и транзисторы;

2) по положению ротора, для надежного удержания его от выпадения из синхронизма.

#### **Выводы и направление дальнейших исследований.**

Для организации указанных обратных связей необходимы соответствующие датчики и регуляторы в составе системы управления ВЭП. Новый описываемый ТПВЭП всего этого не требует, а поэтому его надежность будет более высокой. Применяемый в силовом канале схемы ПИТ, имеет стабильно высокий коэффициент мощности, слабо зависящий от величины нагрузки. В этой связи, можно ожидать, что энергетические показатели ТПВЭП также будут более высокими, чем у традиционного ВЭП, однако это является темой для последующих исследований.

#### **Библиографический список**

1. Hoover D. B. *Rotating-exciter design keeps pace with generator* / D. B. Hoover. — «*Progress Power*», 1960 April. — pp. 445–447.
2. Аракелян А. К. *Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором* / А. К. Аракелян, А. А. Афанасьев, М. Г. Чиликин ; под ред. М. Г. Чиликина. — М. : Энергия, 1977. — 224 с.
3. А.с. СССР, МПК Н 02 М 1/08. *Устройство для управления тиристором* / В. В. Калужный, С. Г. Обухов (СССР). — № 957372; опубли. 1982, Бюл. № 33.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Мотченко А.И.,  
зам. главного энергетика по электрооборудованию ПАО "АМК" Золотаревым Ю.Ф.*

*Статья поступила в редакцию 16.11.15.*

**к.т.н. Калюжний С. В.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

#### **ТОКОПАРАМЕТРИЧНИЙ ВЕНТИЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД**

*Описується оригінальна силова схема вентильного електроприводу з параметричним джерелом струму та гібридним комутатором, що включає елементи автономних інверторів струму і напруги. Наводяться результати моделювання в середовищі Matlab/Simulink.*

**Ключові слова:** *електропривод, синхронний двигун, вентильний комутатор, автономний інвертор струму, автономний інвертор напруги.*

**Ph.D. Kaluigniy S. V.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)

#### **CURRENT-PARAMETRIC VALVE ELECTRICAL DRIVE**

*They describe the original power circuit of a valve electric drive with a parametric current source and a hybrid switch consisting of elements of the autonomous current and voltage inverter. They present the results of modeling in Matlab/Simulink environment.*

**Key words:** *electric drive, synchronous motor, valve switch, autonomous current inverter, autonomous voltage inverter.*