

Б.И. Фираго Д.С. Васильев

ВЕКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Для студентов учреждений высшего образования

Б.И. Фираго Д.С. Васильев

ВЕКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности
«Автоматизированные электроприводы»



Минск
«Вышэйшая школа»
2016

УДК 62-83-52(075.8)

ББК 31.291я73

Ф62

Рецензенты: кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» (кандидат технических наук, доцент *И.Ф. Кузьмицкий*); доктор технических наук, профессор *В.П. Кузнецов*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.

Фираго, Б. И.

Ф62 Векторные системы управления электроприводами : учеб. пособие / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. — Минск : Вышэйшая школа, 2016. — 159 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2624-0.

Изложены физико-математическая сущность и виды векторного управления электродвигателями переменного тока. Рассмотрены математические модели и функциональные схемы прямого и косвенного векторного управления двигателями. Приведены численные расчеты по основным темам.

Для студентов учреждений высшего образования по специальности «Автоматизированные электроприводы». Может быть полезно инженерно-техническим работникам.

УДК 62-83-52(075.8)

ББК 31.291я73

ISBN 978-985-06-2624-0

© Фираго Б.И., Васильев Д.С., 2016

© Оформление. УП «Издательство “Вышэйшая школа”», 2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие включает теоретическую и практическую части. В теоретической части показана сущность векторного управления электродвигателями и выделены виды векторного управления, рассмотрена пространственная векторная широтно-импульсная модуляция напряжения, применяемая в современных ПЧ, представлена векторная диаграмма АД, на которой выделены векторы потокосцеплений, используемые для формирования различных видов векторного управления.

На основе математических моделей эквивалентного двухфазного АД в синхронно вращающейся системе координат x – y составлены структурные схемы при ориентировании оси x вдоль векторов потокосцепления: ротора $\bar{\Psi}_2$, взаимоиндукции $\bar{\Psi}_m$ и статора $\bar{\Psi}_1$. Проанализированы наиболее характерные модели, по которым вычисляются векторы потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_2$, взаимоиндукции $\bar{\Psi}_m$ и статора $\bar{\Psi}_1$.

Для бездатчиковых систем векторного управления показаны методы и модели для вычисления угловой скорости АД и падения скорости.

Результаты исследований способов задания входных величин, вычисления потокосцеплений и скорости затем используются при рассмотрении функциональных схем прямого и косвенного векторного управления АД.

Изложена сущность прямого векторного управления электромагнитным моментом АД в его классической форме, отмечены недостатки такого управления и показаны пути дальнейшего совершенствования этой системы управления, получившей достаточно широкое распространение.

Уделено внимание векторному управлению СДПМ, которое завоевывает свои позиции в диапазоне мощностей до 100 кВт. Получена математическая модель СДПМ в осях координат d – q , тождественная модели ДПТ НВ в осях α – β . Приведены структурные схемы и уравнения механических характеристик двигателя и составлена функциональная схема векторного управления СДПМ. Проанализирована работа СДПМ с упреждающим углом управления для получения скорости выше основной. Разработана математическая модель для этого случая, выведено уравнение механической

характеристики двигателя и составлена структурная схема СДПМ при упреждающем угле управления.

В практической части учебного пособия приведены расчеты на конкретных примерах для основных тем векторного управления. По учебному плану они рассматриваются на практических занятиях и предназначены для более глубокого понимания векторного управления электродвигателями переменного тока.

ВВЕДЕНИЕ

Из большого разнообразия электродвигателей, применяемых в различных отраслях промышленности, на транспорте, в коммунальном хозяйстве и бытовой технике, преобладающими являются электродвигатели переменного тока, главным образом асинхронные двигатели (АД), которые составляют более 75% общего числа электродвигателей. Это связано в первую очередь с их меньшей стоимостью и большей надежностью в работе по сравнению с электродвигателями постоянного тока. Но двигатели постоянного тока с независимым возбуждением (ДПТ НВ) обладают хорошей управляемостью, поэтому давно появилось стремление придать электродвигателям переменного тока такую же управляемость, какую имеют электродвигатели постоянного тока, сохранив при этом их высокие технико-экономические показатели. Долгое время этого не удавалось достичь из-за отсутствия силовых полностью управляемых полупроводниковых преобразователей энергии и быстродействующего информационного их обеспечения.

В 1970-е гг. Ф. Блашке создал первую систему асинхронного частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением, показав пути ее технической реализации [1].

Частотный асинхронный электропривод с векторным управлением по управляемости соответствует электроприводу с ДПТ НВ, который имеет каналы независимого управления магнитным потоком и электромагнитным моментом. В связи с этим все системы векторного управления электродвигателями переменного тока строятся так, чтобы они обладали такими же свойствами по управляемости, как и ДПТ НВ. Однако при создании систем векторного управления АД, который имеет преимущества перед ДПТ НВ в отношении размеров, КПД, максимальной скорости, надежности, стоимости и т.д., возникают сложности, так как АД имеет динамическую модель, описываемую уравнением 6-го порядка. Кроме того, для векторного управления АД требуется преобразователь частоты (ПЧ), стоимость которого в 3–5 раз превышает стоимость самого двигателя [2].

При векторном управлении АД независимое регулирование потокосцепления и электромагнитного момента двигателя осуществляется с помощью составляющих вектора тока

статора по осям синхронно вращающейся прямоугольной системы координат $x-y$. Но вектор тока статора – это физическая величина, его амплитуда формируется из его составляющих по осям координат. Изменение одной составляющей (проекции на ось координат) с неизбежностью приведет к изменению другой составляющей (проекции на другую ось координат) и не позволит независимо регулировать эти составляющие, определяющие потокосцепление и электромагнитный момент АД.

Чтобы иметь возможность независимого регулирования магнитного потока и электромагнитного момента двигателя, необходимо в систему управления вводить напряжения, компенсирующие ЭДС вращения [3]. Затем из этих составляющих создается вектор тока статора. Синтезированный таким образом при задании потокосцепления и электромагнитного момента вектор тока статора должен с помощью своих проекций входить в уравнения задания вектора напряжения АД, где присутствуют скомпенсированные ранее ЭДС вращения.

Через координатные преобразования сформированный вектор задания напряжения АД (по первой гармонике) реализуется с помощью переключающих функций транзисторов в пространственной векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), создавая такую первую гармонику напряжения на входе преобразователя частоты (ПЧ), которая обеспечит протекание по обмоткам двигателя тока, соответствующего заданным составляющим.

Для формирования систем векторного управления АД используют следующие векторы магнитного потокосцепления: статора, взаимоиндукции и ротора. Векторы потокосцеплений можно измерять или вычислять по соответствующим моделям. В настоящее время системы векторного управления АД строятся с использованием вычисления векторов потокосцеплений. В современных системах векторного управления угловая скорость двигателя или измеряется с помощью машинных датчиков (энкодеров или резольверов), или вычисляется по соответствующим моделям на основе информации, получаемой с датчиков тока и напряжения на выходе ПЧ. Наиболее простым и распространенным является бездатчиковое косвенное векторное управление АД, но точность его реализации значительно ниже, чем при наличии машинных датчиков. Частично погрешность уменьшают за счет введения автоматической подстройки параметров. Тем не менее современные без-

датчиковые системы векторного управления АД не позволяют управлять моментом двигателя при нулевой скорости. В широком понимании к векторному управлению относят прямое управление моментом АД [4, 8].

Векторное управление также применяется в вентильных двигателях переменного тока, примером которых являются синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) [8]. Из этой краткой характеристики видно, что существует большое разнообразие видов векторного управления электродвигателями переменного тока. В настоящее время насчитывается более 20 видов векторного управления [4].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Глава 1. Сущность векторного управления электродвигателями. Виды векторного управления

Трехфазный АД с короткозамкнутым ротором был изобретен и изготовлен М.О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Из-за своей простоты, прочности, надежности, высокого КПД, низкой стоимости, компактности, преимуществ массового производства АД с короткозамкнутым ротором являются наиболее широко используемыми электрическими машинами, работающими при постоянной скорости. Это особенно касается малых мощностей, где короткозамкнутая обмотка ротора выполняется с помощью заливки пазов, в основном алюминиием.

АД потребляют около 90% электроэнергии, идущей на питание всех электродвигателей, или, по-другому, примерно 40% всей вырабатываемой электроэнергии.

Развитие техники и технологии требует увеличения регулируемых электроприводов, где до последнего времени доминирующими были двигатели постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ), обладающие хорошими регулировочными свойствами, но уступающие двигателям переменного тока по технико-экономическим показателям. Исследователи и инженеры стремились создать регулируемый электропривод переменного тока, который сочетал бы в себе регулировочные свойства ДПТ НВ и технико-экономические показатели АД.

Существовавшие в то время силовые управляемые полупроводниковые приборы не позволяли достичь желаемых результатов. Но в 1972 г. появилась статья Блашке, где была описана первая система асинхронного частотного электропривода с векторным управлением и показаны пути ее реализации [1].

Из основного уравнения движения электропривода

$$M - M_c = M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

следует, что интенсивность изменения угловой скорости ω определяется величиной динамического момента $M_{\text{дин}}$, а при постоянной величине момента инерции J и статического мо-

мента M_c — электромагнитным моментом M двигателя. Следовательно, для хорошей управляемости электропривода необходимо иметь хорошо регулируемый электромагнитный момент двигателя. В свою очередь, электромагнитный момент двигателя определяется произведением магнитного потока Φ (или потокосцепления Ψ) на ток якоря $i_{я}$.

Для нормальной работы электродвигателя магнитный поток следует поддерживать на допустимом уровне, при этом желательно иметь независимое регулирование магнитного потока и электромагнитного момента. Такие условия выполняются в ДПТ НВ с компенсационной обмоткой и питанием якоря двигателя от управляемого преобразователя напряжения УПН (рис. 1.1). Величина тока возбуждения $i_{в}$, а следовательно, и магнитного потока Φ устанавливается с помощью регулятора тока возбуждения РТВ, управляемого сигналом U_y . Напряжение на якоре $U_{я}$ определяется системой управления СУ управляемого преобразователя напряжения УПН.

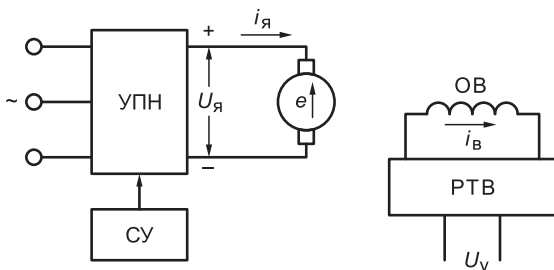


Рис. 1.1. Схема регулируемого электропривода по системе УПН–ДПТ НВ

В таком электроприводе векторы магнитного потока $\bar{\Phi}$ и тока якоря $\bar{i}_{я}$ неподвижны относительно друг друга и находятся под углом 90° : вектор $\bar{\Phi}$ расположен по продольной оси $l\beta$, а вектор $\bar{i}_{я}$ — по поперечной оси $l\alpha$ электродвигателя (рис. 1.2).

В ДПТ НВ магнитный поток Φ и электромагнитный момент M определяются следующими выражениями:

$$\Phi = L_{\phi} i_{в}; \quad (1.2)$$

$$M = K\Phi i_{я}, \quad (1.3)$$

где $K = \frac{p_{\text{п}} N}{2\pi a}$; $L_{\phi} = \frac{2\pi a}{N} L_{12}$; N – число активных проводников обмотки якоря; a – число пар параллельных ветвей обмотки; $p_{\text{п}}$ – число пар полюсов; L_{12} – взаимная индуктивность между обмоткой статора и ротора; K – конструктивный коэффициент двигателя; L_{ϕ} – эквивалентная индуктивность, связывающая магнитный поток взаимоиндукции Φ с током возбуждения двигателя $i_{\text{в}}$ в соответствии с кривой намагничивания (рис. 1.3).

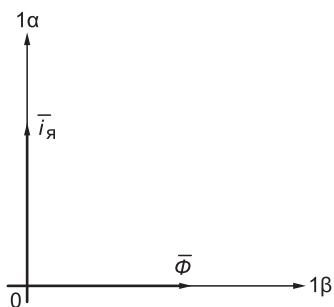


Рис. 1.2. Расположение векторов магнитного потока Φ и тока якоря $i_{\text{я}}$ в осях α – β ДПТ НВ

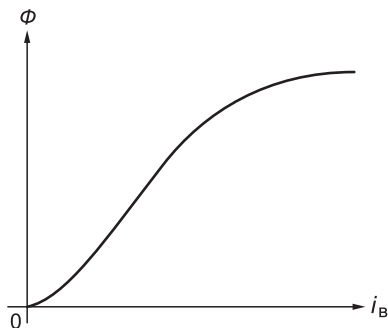


Рис. 1.3. Кривая намагничивания ДПТ НВ

ДПТ НВ имеет два независимых канала управления:

1) током возбуждения $i_{\text{в}}$ с помощью напряжения возбуждения $U_{\text{в}}$:

$$i_{\text{в}} = \frac{U_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} = \frac{K_{\text{в}} U_{\text{у}}}{R_{\text{в}}}; \quad (1.4)$$

2) током якоря $i_{\text{я}}$ с помощью напряжения $U_{\text{я}}$ на выходе УПН:

$$i_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} - e}{R_{\text{я}}} = \frac{U_{\text{я}} - K\Phi\omega}{R_{\text{я}}}, \quad (1.5)$$

где $R_{\text{в}}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения (ОВ); $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление обмотки якоря; ω – угловая скорость двигателя; $e = K\Phi\omega$ – ЭДС вращения.

Целью векторного управления АД является создание условий, подобных условиям ДПТ НВ:

- 1) перпендикулярность расположения векторов, формирующих электромагнитный момент;
- 2) возможность независимого регулирования магнитного потока и электромагнитного момента.

Нелинейная динамическая модель АД требует более сложных систем управления по сравнению с ДПТ НВ. Общая динамическая модель АД может быть представлена уравнением 6-го порядка, где входными величинами являются напряжение статора и частота, а выходными могут быть скорость, электромагнитный момент, угол поворота ротора, потокосцепление статора, ротора или взаимоиндукции, токи статора или ротора, намагничивающий ток или их комбинации.

Для векторного управления АД необходимо иметь ПЧ, стоимость которого в 3–5 раз превышает стоимость самого двигателя [2]. Однако быстрое развитие силовой электроники способствует уменьшению стоимости ПЧ, что ведет к широкому распространению частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в различных отраслях промышленности, коммунальном хозяйстве и на транспорте.

Существенное отличие АД от ДПТ НВ состоит в том, что АД имеет только один канал управления: по обмотке статора, где магнитный поток создается намагничивающим током, который является суммой тока статора и приведенного тока ротора.

Чтобы иметь возможность независимого регулирования магнитного потока и электромагнитного момента АД, необходимо в систему управления ПЧ – АД ввести напряжения, компенсирующие ЭДС вращения. После этого в токе статора можно выделить две составляющие: «намагничивающую», которая определяет требуемое потокосцепление, и «моментную», регулируемую электромагнитный момент. Эти составляющие аналогичны току возбуждения и току якоря ДПТ НВ.

Как следует из теории обобщенной электрической машины [3], в синхронно вращающейся системе координат x – y все векторы электромагнитных величин неподвижны, как в модели ДПТ НВ, т.е. в координатных осях x – y мы имеем величины постоянного тока. Поэтому задающие величины для векторного управления рассматриваются в системе координат x – y , где формируется требуемое управление векторами, аналогичное управлению ДПТ НВ в системе УПН–ДПТ. Но реализация этого управления осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции в ПЧ, который находится в неподвижной системе координат α – β . А для получения сигналов обратных

связей в системе координат $x-y$ используют преобразование переменных из осей $\alpha - \beta$ в оси $x-y$. Следовательно, неизменным атрибутом векторного управления являются прямые и обратные координатные преобразования переменных.

В АД различают три вектора потокосцепления: статора $\bar{\Psi}_1$, взаимоиндукции $\bar{\Psi}_m$ и ротора $\bar{\Psi}_2$, которые в осях $x-y$ неподвижны. Каждый из этих векторов потокосцепления можно использовать для формирования электромагнитного момента АД [3].

С целью удобства управления ось x системы координат $x-y$ можно совместить с одним из векторов потокосцепления: $\bar{\Psi}_1$, $\bar{\Psi}_m$ или $\bar{\Psi}_2$. В результате получаем три вида векторного управления по этому признаку. Кроме того, возникает проблема определения векторов данных потокосцеплений. В связи с этим различают прямое и косвенное векторное управление АД.

Важнейшим признаком **прямого векторного управления** АД является непосредственное измерение или вычисление (оценка) величины вектора потокосцепления (статора $\bar{\Psi}_1$, взаимоиндукции $\bar{\Psi}_m$ или ротора $\bar{\Psi}_2$) и его положения. Для измерения потокосцепления могут использоваться датчики Холла, измерительные катушки, отпайки от обмотки статора и т.п.

Вычисление величины вектора потокосцепления и его положения осуществляется по так называемым моделям магнитного потока, где входными величинами являются мгновенные значения напряжений и токов АД, измеренные электрическими датчиками.

Помимо этого прямое векторное управление АД может быть реализовано с использованием датчика скорости (или положения) или без него, т.е. с косвенным определением скорости по модели.

Различают:

- прямое векторное управление с датчиком потокосцепления и датчиком скорости;
- прямое векторное управление с вычислением потокосцепления и датчиком скорости;
- бездатчиковое прямое векторное управление с вычислением потокосцепления и скорости.

При **косвенном векторном управлении** используется математическая модель АД, на основе которой выявляются внутренние связи между величинами, которые затем применяются в управлении.

Различают:

- косвенное векторное управление с обратной связью по углу положения ротора и машинным датчиком скорости (или положения);
- косвенное векторное управление с обратной связью по углу положения ротора и вычислителем скорости – бездатчиковое векторное управление.

Каждое из указанных видов может отличаться использованием векторов потокосцеплений: $\bar{\Psi}_1$, $\bar{\Psi}_m$ или $\bar{\Psi}_2$.

Таким образом, уже можно насчитать $3 \cdot 5 = 15$ видов векторного управления. Как указывает профессор Питер Вас, в настоящее время насчитывается более 20 видов векторного управления АД [4].

Из этого разнообразия видов векторного управления более всего применяются:

- 1) прямое векторное управление с косвенным определением потокосцепления и датчиком скорости;
- 2) бездатчиковое прямое векторное управление;
- 3) косвенное векторное управление с датчиком скорости (положения);
- 4) бездатчиковое косвенное векторное управление.

Наиболее простым и распространенным является бездатчиковое косвенное векторное управление АД. К недостаткам косвенного бездатчикового векторного управления можно отнести зависимость точности его реализации от точности определения параметров, которые изменяются с изменением температуры, частоты, величины тока и магнитного насыщения АД. Из-за неточности определения параметров и их зависимости от условий работы характеристики АД при косвенном векторном управлении существенно отличаются от заданных.

В бездатчиковых системах точность поддержания скорости примерно в 100 раз меньше по сравнению с системами, где она измеряется датчиками. Поэтому в косвенных системах векторного управления вводятся устройства идентификации параметров на основе паспортных данных электродвигателя и автоматическая подстройка параметров в процессе работы. Тем не менее бездатчиковая система векторного управления АД не позволяет управлять моментом двигателя при нулевой скорости, что обычно требуется в электроприводах механизмов подъема грузов. Поэтому для электроприводов грузоподъемных механизмов применяют векторные системы управления с машинным датчиком скорости.

Еще одна особенность косвенного векторного управления состоит в том, что мощность АД и мощность ПЧ не должны отличаться более чем в 3–4 раза. Это связано с тем, что цифровая модель АД, заложенная в систему управления, имеет ограничения на предельные значения параметров.

В широком понимании к векторному управлению можно отнести прямое управление электромагнитным моментом АД и потокосцеплением статора, которое в обобщенном виде делится на классическую систему DTC (от англ. Direct Torque Control) и DTC с пространственной векторной ШИМ.

Из указанных систем векторного управления самое широкое распространение получили системы прямого и косвенного векторного управления с ориентацией оси x синхронно вращающейся системы координат x – y вдоль вектора потокосцепления ротора Ψ_2 , поскольку в этом случае получаются наиболее простые соотношения для управляющих величин.

В связи с тем что системы векторного управления АД строятся по принципу подчиненного регулирования, анализ динамики векторных электроприводов выполняют аналогично анализу динамики электроприводов постоянного тока. Отличие обычно состоит в различных способах реализации компенсации перекрестных обратных связей, возникающих в каналах управления электромагнитным моментом и потокосцеплением.

Векторное управление применяют также в синхронных двигателях с постоянными магнитами и с электромагнитным возбуждением.

Обычно общий диапазон регулирования скорости разделяют на первый: $0 < \omega \leq \omega_{\text{ном}}$ и второй: $\omega_{\text{ном}} \leq \omega \leq \omega_{\text{max}}$.

В первом диапазоне регулирование скорости выполняют при постоянном допустимом моменте (с независимым охлаждением двигателя), а во втором диапазоне — при постоянстве допустимой мощности. В СДПМ возможности регулирования скорости во втором диапазоне сильно ограничены.

Глава. 2. Пространственная векторная широтно-импульсная модуляция напряжения автономного инвертора напряжения (АИН)

2.1. Векторное представление выходного напряжения АИН

Пространственная векторная ШИМ была предложена в 1982 г. инженерами Пфафом, Вештой, Виком и дальше раз-

рабатывалась Ван дер Броком, Скудельным и Штанке [5]. С 1992 г. пространственная векторная ШИМ начала внедряться в ПЧ.

Стратегия пространственной векторной ШИМ основана на векторном представлении напряжения переменного тока и ориентирована на микропроцессорную реализацию [5, 6].

В системах векторного управления АД обычно ПЧ состоит из выпрямителя с выходным напряжением постоянного тока U_d и автономного инвертора напряжения, формирующего трехфазное напряжение для обмоток статора АД (рис. 2.1). Силовая схема АИН содержит 6 транзисторных ключей, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний: включенном или выключенном. Если $a^+ = 1, b^+ = 1, c^+ = 1$, то верхние ключи замкнуты (включены). При $a^+ = 0, b^+ = 0, c^+ = 0$ верхние ключи разомкнуты (выключены).

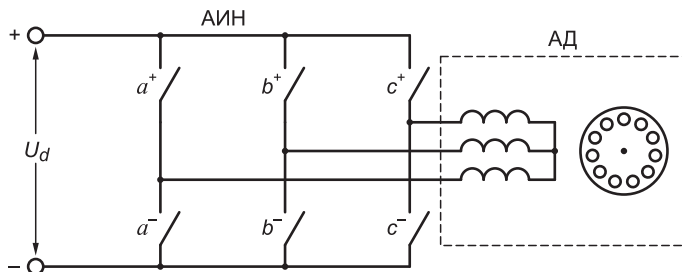


Рис. 2.1. Силовая схема структуры АИН–АД

Если $a^- = 1, b^- = 1, c^- = 1$, то нижние ключи замкнуты (включены). При $a^- = 0, b^- = 0, c^- = 0$ нижние ключи разомкнуты (выключены). Состояние транзисторного ключа S определяется двоичным кодом: 1, 0.

Обозначим:

S^+ – переключающие функции для верхних ключей;

S^- – переключающие функции для нижних ключей.

Для каждого из ключей можно записать переключающие функции:

$$S_a^+ = \overline{S_a^-}; S_b^+ = \overline{S_b^-}; S_c^+ = \overline{S_c^-};$$

$$S_a^- = \overline{S_a^+}; S_b^- = \overline{S_b^+}; S_c^- = \overline{S_c^+},$$

где черта сверху обозначает инверсную переключающую функцию.

Трехфазный двухуровневый АИН дает 8 возможных состояний ключей, из них 6 активных и 2 нулевых состояния. При переключении транзисторов АИН через каждые 60° периода выходного напряжения максимальная величина линейного (междуфазного) напряжения будет равна U_d , а максимальная величина фазного напряжения составит $2/3 U_d$ [6].

В течение 60° периода выходного напряжения положение вектора линейного напряжения будет неизменным. Через каждые 60° вектор линейного напряжения \bar{U} скачком изменяет положение при прежнем значении величины, равной U_d .

Положение вектора \bar{U} на комплексной плоскости через каждые 60° можно записать тремя цифрами в двоичном коде, основываясь на переключающих функциях транзисторов (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Коды векторов напряжения и переключающие функции транзисторов АИН

Вектор напряжения	Код вектора	Состояние ключей		
		S_a^+	S_b^+	S_c^+
\bar{U}_1	100	1	0	0
\bar{U}_2	110	1	1	0
\bar{U}_3	010	0	1	0
\bar{U}_4	011	0	1	1
\bar{U}_5	001	0	0	1
\bar{U}_6	101	1	0	1
\bar{U}_7	111	1	1	1
\bar{U}_8	000	0	0	0

Векторы линейных напряжений АИН на комплексной плоскости и их коды показаны на рис. 2.2.

Кривые двухфазного напряжения на выходе АИН при шестипульсном управлении в осях α – β определяются следующими выражениями:

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ 8

<i>Глава 1.</i> Сущность векторного управления электродвигателями. Виды векторного управления	8
--	---

<i>Глава 2.</i> Пространственная векторная широтно-импульсная модуляция напряжения автономного инвертора напряжения (АИН)	14
---	----

2.1. Векторное представление выходного напряжения АИН.	14
2.2. Формирование желаемого вектора напряжения на выходе АИН	18

<i>Глава 3.</i> Векторная диаграмма асинхронного двигателя в синхронно вращающейся системе координат $x-y$	25
--	----

<i>Глава 4.</i> Математические модели и структурные схемы эквивалентного двухфазного АД в синхронно вращающейся системе координат $x-y$	31
---	----

<i>Глава 5.</i> Вычисление потокосцеплений ротора, взаимоиндукции и статора по моделям АД	40
---	----

5.1. Вычисление потокосцепления ротора по уравнениям ротора АД при наличии датчика скорости	40
5.2. Вычисление вектора потокосцепления ротора по уравнениям статора АД в неподвижных осях координат $\alpha-\beta$	42
5.3. Вычисление вектора потокосцепления взаимоиндукции . . .	45
5.4. Вычисление вектора потокосцепления статора	47

<i>Глава 6.</i> Вычисление скорости и падения скорости по моделям АД . . .	48
--	----

<i>Глава 7.</i> Функциональная схема прямого векторного управления АД с датчиком скорости и вычислителем потокосцепления ротора.	52
---	----

<i>Глава 8.</i> Функциональная схема косвенного векторного управления АД	61
--	----

<i>Глава 9.</i> Функциональная схема прямого векторного управления АД с датчиком скорости и вычислителем потокосцепления взаимоиндукции	66
---	----

<i>Глава 10.</i> Функциональная схема прямого векторного управления АД с датчиком скорости и вычислителем потокосцепления статора	69
<i>Глава 11.</i> Прямое управление электромагнитным моментом и потокосцеплением статора АД.	73
<i>Глава 12.</i> Векторное управление синхронными электродвигателями	82
12.1. Регулируемые синхронные электродвигатели.	82
12.2. Математические модели и свойства трехфазных СДПМ при отсутствии продольной реакции якоря	87
12.3. Математические модели и свойства трехфазных СДПМ при наличии продольной размагничивающей реакции якоря ..	94
12.4. Определение параметров СДПМ по каталожным данным	102
12.5. Функциональная схема векторного управления СДПМ ..	106

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

РАСЧЕТЫ ПО ВЕКТОРНОМУ УПРАВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

109

Глава 13. Пространственная векторная широтно-импульсная модуляция напряжения

109

Глава 14. Векторная диаграмма АД в синхронно вращающейся системе координат.

110

Глава 15. Функциональная схема прямого векторного управления АД с датчиком скорости и вычислителем потокосцепления ротора.

114

Глава 16. Функциональная схема прямого бездатчикового векторного управления АД с вычислителем потокосцепления ротора и скорости двигателя

124

Глава 17. Функциональная схема прямого векторного управления АД с датчиком скорости и вычислителем потокосцепления взаимоиндукции

131

Глава 18. Функциональная схема прямого векторного управления АД с датчиком скорости и вычислителем потокосцепления статора

136

Глава 19. Векторное управление трехфазными СДПМ.

141

A. Угол опережения управления $\theta_{эл} = 0$

141

 19.1. Расчет параметров и механической характеристики СДПМ типа SGMSH-50D фирмы Omron

142

19.2. Расчет параметров, показателей и механической характеристики СДПМ типа 1FT6168-8-WB7 фирмы Siemens . . .	144
Б. Угол опережения управления $\theta_{эл} < 0$	146
19.3. Расчет механической и электромеханической характеристик СДПМ типа SGMSH-50D фирмы Omron для скорости выше основной	146
19.4. Расчет механической и электромеханической характеристик СДПМ типа 1FT6168-8-WB7 фирмы Siemens для максимального угла опережения управления	150
ПРИЛОЖЕНИЕ	153
ЛИТЕРАТУРА	156

Учебное издание

Фираго Бронислав Иосифович
Васильев Дмитрий Сергеевич

**ВЕКТОРНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Макейчик*
Художественный редактор *В.А. Ярошевич*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректор *О.И. Голденкова*
Компьютерная верстка *Н.В. Шабуня*

Подписано в печать 23.02.2016. Формат 84×108/32. Бумага офсетная.
Гарнитура «Ньютон». Офсетная печать. Усл. печ. л. 8,4. Уч.-изд. л. 7,6.
Тираж 400 экз. Заказ 494.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.

Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.

e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Типография “Победа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/38 от 29.01.2014.

Ул. Тавлая, 11, 222310, Молодечно.