

## РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНЫЙ РЕГУЛЯТОР ТОКА АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

**Введение.** В последнее время огромное внимание уделяется повышению уровня электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода с питающей сетью переменного тока. Для этих целей используют такой класс устройств как активные выпрямители (АВ). По мнению автора, первоочередной задачей АВ является обеспечение потребления синусоидального тока с низким числом гармоник и единичного коэффициента сдвига фаз  $\cos \varphi$ . Немаловажную роль в формировании заданного тока играет регулятор тока. Большой интерес в научной литературе наблюдается к релейно-векторным регуляторам тока (РВРТ) [1-3], которые, как известно, обеспечивают наибольшее быстродействие и высокую точность регулирования тока. Однако, описанные в [1-3], оптимальные по быстродействию РВРТ обладают некоторыми недостатками, а именно:

- данные регуляторы рассматривались применительно к регулируемому электроприводу переменного тока и не учитывают специфики АВ;
- оптимальное по быстродействию регулирование тока в задачах регулирования тока АВ может привести к увеличению частоты коммутации ключей преобразователя и снижению точности регулирования;
- описанные РВРТ ориентированы на применение в цифровых системах и на их точность влияет период дискретизации цифровой системы управления, что в свою очередь приводит к ужесточению требований к микроконтроллеру системы регулирования.

**Постановка задачи исследования.** Задачей данной работы является усовершенствование релейно-векторного регулятора тока АВ с целью снижения числа коммутаций силовых ключей преобразователя, повышения точности регулирования входного тока АВ и уменьшения влияния величины периода дискретизации цифровой системы.

**Материалы исследования.** Структурная схема силовой части активного выпрямителя (АВ) и системы регулирования представлена на рис. 1 [4]. Автономный инвертор напряжения (АИН) на полностью управляемых ключах (IGBT, MOSFET, GTO) подключается к сети переменного тока с фазными ЭДС  $e_a, e_b, e_c$  через дроссели  $L_{др}$ . Для качественного регулирования напряжения  $U_d$  на конденсаторе необходимо обеспечить стабильный ток заряда/разряда конденсатора. Это значит, что активный выпрямитель должен работать в режиме источника тока, что возможно при охвате его отрицательной обратной связью по току. При этом, для обеспечения управляемости ключей, напряжение в звене постоянного тока  $U_d$  должно быть больше амплитудного значения линейного напряжения сети  $U_d > U_{лн}$ . Задание на амплитуду тока инвертора формируется регулятором напряжения РН. Для формирования задания на синусоидальные токи  $I_{z\alpha}$  и  $I_{z\beta}$  измеряются сетевые ЭДС с последующим преобразованием в  $E_\alpha$  и  $E_\beta$ . Полученные значения напряжения делятся на амплитуду фазной ЭДС  $E_m$ . Таким образом, получается синусоида единичной амплитуды, которая умножается на заданную амплитуду тока. В блоке БВ по полученным ошибкам регулирования тока определяются модуль и фаза вектора ошибки тока. Блок БВ осуществляет выбор необходимого вектора напряжения инвертора по результатам вычисления блока БВ в соответствии, например, с [2,3]. На рис. 2 представлены упрощенная силовая схема и векторная диаграмма состояний АИН. Каждому обобщенному вектору напряжения соответствует определенное сочетание замкнутых ключей, обозначенных цифрами. Вектора  $U_1 - U_6$  ненулевые и сдвинуты на  $60^\circ$  градусов. Вектора  $+0$  и  $-0$  соответствуют нулевым состояниям, при выборе которых все фазы нагрузки подключаются к шине  $+U_d$  или  $-U_d$ .

Учитывая тот факт, что АВ должен работать в режиме обеспечения коэффициента сдвига фаз  $\cos \varphi = 1$ , обозначим специфику данного устройства, о которой упоминалось выше:

- в отличие от электропривода АВ является объектом, у которого можно непосредственно измерить все необходимые величины: входной переменный ток сети, напряжение сети (противо-ЭДС), напряжение и ток в звене постоянного тока;

- напряжение сети (противо-ЭДС) является величиной задающей фазу тока, поэтому заданный угол сдвига фаз между током и напряжением сети всегда равен  $0^\circ$  или  $180^\circ$ .

Рассмотрим принцип векторного регулирования тока в неподвижной координатной системе  $\alpha-\beta$ , связанной с вектором фазы  $A$  и используемой в [2,3]. В [1] используется система  $x-y$ , ориентированная вещественной осью  $x$  по вектору напряжения сети, но порядок определения ошибки тока и выбора необходимого вектора напряжения АВ схожи с [2].

Вектор ошибки  $\delta \bar{I}$  регулирования тока есть разность между векторами заданного  $\bar{I}_z$  и действительного токов  $\bar{I}$  ( $\delta \bar{I} = \bar{I}_z - \bar{I}$ ). Модуль и фаза вектора ошибки тока определяются через его проекции  $\delta_\alpha$  и  $\delta_\beta$  по осям  $\alpha$  и  $\beta$

$$(\delta_\alpha = I_{z\alpha} - I_\alpha, \delta_\beta = I_{z\beta} - I_\beta, \delta I = \sqrt{\delta_\alpha^2 + \delta_\beta^2}, \delta \varphi = \arctg(\delta_\beta / \delta_\alpha)) \text{ (рис. 3).}$$

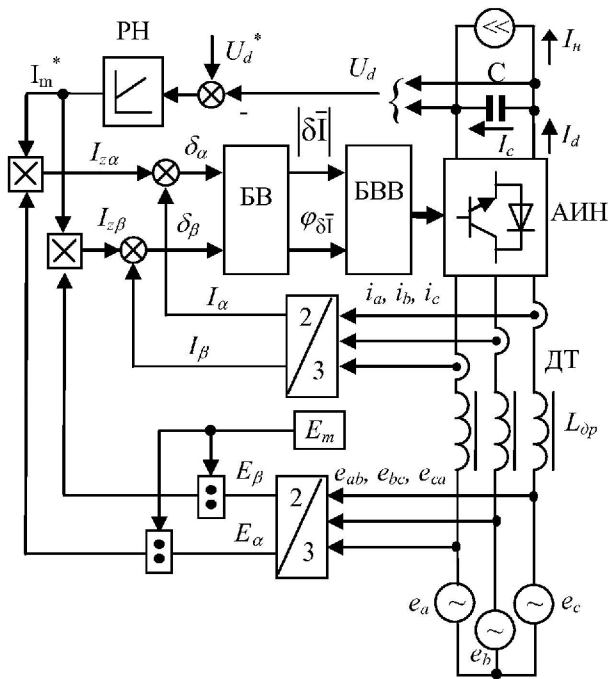


Рис. 1 Активный выпрямитель с системой регулирования: РН – регулятор напряжения, АИН - автономный инвертор напряжения, ДТ – датчик тока, БВ – блок выделения вектора ошибки тока, БВВ – блок выбора вектора напряжения

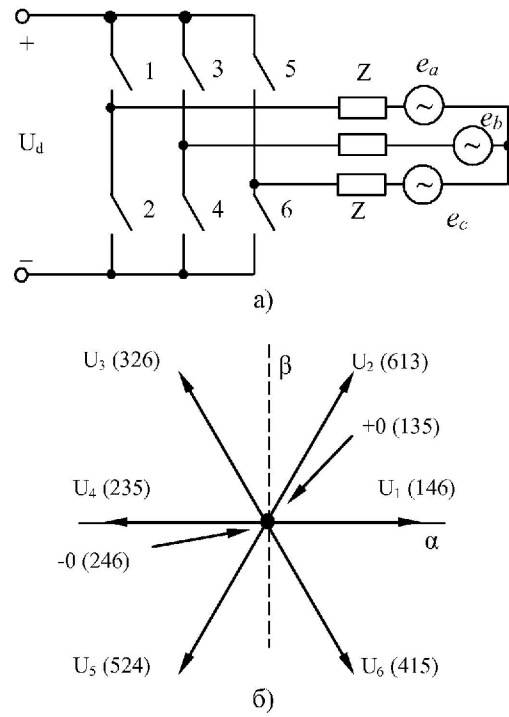


Рис. 2 Автономный инвертор напряжения: а – упрощенная силовая схема, б – векторная диаграмма состояний

Внутри допустимой области (ДО) радиусом  $\Delta$  модуль ошибки регулирования тока не превосходит допустимой величины и никаких переключений регулятора не происходит. При выходе за границы ДО выбирается новое состояние (вектор напряжения) инвертора, которое позволит как можно быстрее вернуть ошибку в заданные пределы. В [1] оптимальное быстродействие определено как максимально быстрое уменьшение модуля вектора ошибки без изменения его фазы, что позволяет минимизировать одновременно как амплитудную, так и фазовую ошибку регулирования тока. Исходя из этого, задачей любого быстродействующего РВРТ является отыскание такого вектора напряжения, который обеспечит движение конца вектора тока по направлению вектора ошибки через центр ДО. В различных РВРТ используются различные подходы к нахождению необходимого вектора напряжения АВ, но так или иначе все они сводятся к решению уравнение вида  $\bar{U} = \bar{I}R + L \frac{d\bar{I}}{dt} + \bar{E}$  для всех возможных состояний АВ. По результатам расчетов определяется наилучший вектор напряжения, который обеспечит наибольший вектор производной тока  $\frac{d\bar{I}}{dt} = \frac{\bar{U} + \bar{E}}{L}$  в заданном направлении (составляющей  $\bar{I}R$  пренебрегаем ввиду ее малости). Из всех возможных векторов напряжения АВ только один может обеспечить наибольшую скорость движения вектора действительного тока (уменьшения модуля вектора ошибки тока) в заданном направлении. При этом практически всегда наблюдается фазовая и амплитудная ошибки, так как АВ имеет конечное число состояний и выбранный вектор не всегда в полной мере соответствует расчетному.

Рассмотрим ситуацию, представленную на рис. 4. Имеется вектор ошибки тока  $\delta\bar{I}$ . Для выбора необходимого вектора напряжения по выше приведенному выражению определим вектора производных тока  $\left( L \frac{d\bar{I}}{dt} \right)_i$ . Проанализируем их действие (рис. 5). Введем систему координат  $jk$ , положительное направление оси абсцисс  $k$  которой совпадает с направлением вектора  $\delta\bar{I}$ . Спроецируем вектора  $\left( L \frac{d\bar{I}}{dt} \right)_i$  на оси  $j, k$ . Проекция вектора по оси  $k$  изменяет модуль вектора  $\delta\bar{I}$ , а проекция по оси ординат  $j$  осуществляет поворот вектора  $\delta\bar{I}$ . Из рисунка видно, что из всех возможных векторов производной тока на вектор  $\delta\bar{I}$  в заданном направлении действуют три вектора:  $\left( L \frac{d\bar{I}}{dt} \right)_1$ ,  $\left( L \frac{d\bar{I}}{dt} \right)_2$ ,  $\left( L \frac{d\bar{I}}{dt} \right)_3$ . Наибольшее влияние на модуль вектора  $\delta\bar{I}$  оказывает вектор  $\left( L \frac{d\bar{I}}{dt} \right)_2$ , ко-

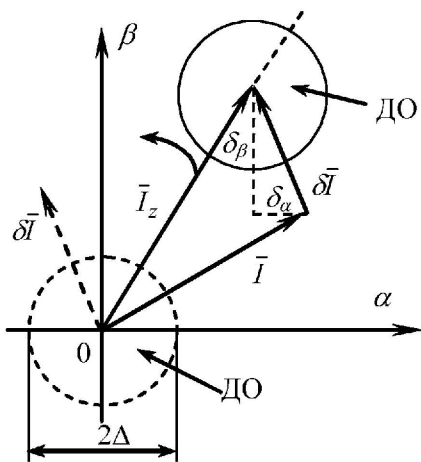


Рис. 3 Ошибка регулирования тока

дольше в ДО полностью удовлетворяет условиям релейного регулирования тока. 2. Цифровая система управления имеет период дискретизации  $T$ , в большей части которого не формируются управляющие воздействия. 3. Вектор заданного тока  $\bar{I}_z$  вращается с круговой частотой сети  $\omega=2\pi f$ , где  $f=50$  Гц. Вектор  $\bar{V}_\tau$  линейной скорости поворота конца вектора  $\bar{I}_z$  определится как:  $\bar{V}_\tau = \frac{d}{dt}(I_z e^{j\omega t}) = I_z e^{j\omega t} j\omega = j\omega I_z e^{j\omega t}$ , где  $T$  – период дискретизации цифровой системы управления,  $n$  – количество периодов. Период дискретизации системы управления достаточно мал и за этот промежуток времени вектор заданного тока повернется на очень малый угол. Это позволяет сказать, что на периоде дискретизации вектор заданного тока неподвижен. 4. Для малых периодов дискретизации вектор приращения тока можно рассчитать по формуле [1]:  $\Delta\bar{I} = \frac{\bar{U} + \bar{E}}{L} \Delta t = \frac{\bar{U} + \bar{E}}{L} T$ . Скорость перемещения вектора  $\bar{I}$  будет превосходить скорость поворота вектора заданного тока  $\bar{I}_z$  на один-два порядка, что определяет частоту коммутации ключей АВ в килогерцы. Пусть будет выбран оптимальный по быстродействию вектор напряжения ( $\bar{U}_2$  на рис. 5). Этот вектор обеспечит самое большое приращение вектора  $\Delta\bar{I}$  на периоде дискретизации и за этот промежуток времени вектор тока  $\bar{I}$  переместится на расстояние большее диаметра ДО и выйдет далеко за пределы ДО. При этом при фазовом рассогласовании векторов  $\Delta\bar{I}$  и  $\delta\bar{I}$  время пребывания вектора тока  $\bar{I}$  в ДО сократится. При выборе вектора с меньшим быстродействием, но меньшим фазовым рассогласованием за тот же период дискретизации вектором тока  $\bar{I}$  будет пройдено меньшее расстояние, увеличится время пребывания в ДО и уменьшится вылет за границы ДО. Это обеспечит уменьшение частоты коммутаций инвертора и повышение точности регулирования тока. Для повышения точности при оптимальном по быстродействию регулировании необходимо уменьшать период дискретизации, что приведет к повышению частоты коммутаций инвертора.

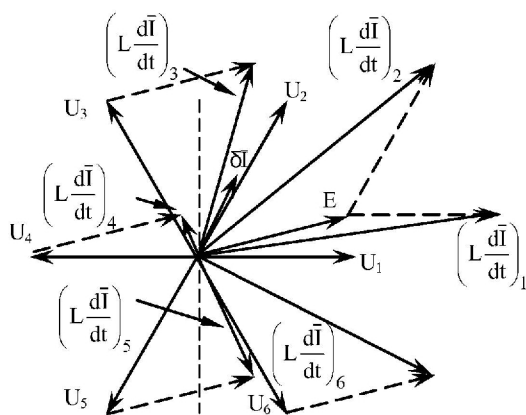


Рис. 4 Формирование вектора производной тока

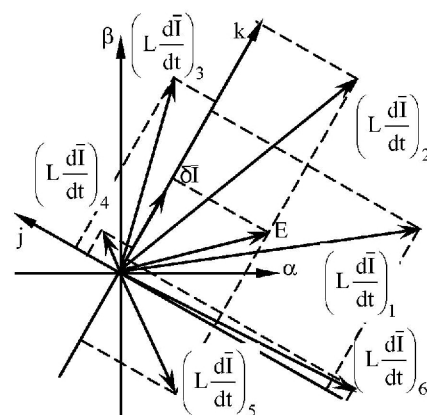


Рис. 5 Влияние вектора производной тока на вектор ошибки тока

торый и обеспечивает наибольшее быстродействие и будет выбран в регуляторах [1-3]. Вектор  $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_1$  осуществляет больше поворот вектора  $\delta\bar{I}$ , чем уменьшение модуля и подходит меньше всего. Вектор  $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_3$  осуществляет наименьший поворот вектора  $\delta\bar{I}$  (имеет наименьшее фазовое рассогласование с вектором  $\delta\bar{I}$ ), но при этом более медленно уменьшает модуль вектора  $\delta\bar{I}$  чем  $\left(L \frac{d\bar{I}}{dt}\right)_2$ . Это означает, что конец вектора тока будет перемещаться по траектории наиболее близко проходящей от центра ДО.

Поясним почему, по мнению автора, выбор оптимального по быстродействию вектора напряжения является недостатком в задачах регулирования тока АВ. 1. Нахождение конца вектора тока  $\bar{I}$  как можно ближе к центру ДО (ошибка меньше заданной) и как можно

При решении задачи выбора вектора напряжения число рассматриваемых вариантов можно сократить до 4 (рис. 5) – три ближайших к вектору  $\vec{\delta I}$  вектора напряжения и вектор ЭДС сети. Из этих векторов один всегда самый быстродействующий, еще один имеет наименьший фазовый сдвиг, но меньшее быстродействие. Иногда быстродействие и минимальный фазовый сдвиг могут сочетаться в одном векторе. Положение вектора ЭДС сети влияет на выбор нулевого состояния АВ. Если вектор ЭДС сонаправлен с вектором ошибки тока  $\vec{\delta I}$ , то при выборе нулевого состояния ток будет меняться под действием ЭДС с самой малой скоростью, так как амплитуда вектора ЭДС меньше чем вектора напряжения или вектора их геометрической суммы.

Таким образом, можно сформировать порядок выбора вектора напряжения АВ:

1. определяем положение вектора ошибки тока  $\vec{\delta I}$ ,
2. по положению вектора  $\vec{\delta I}$  определяем три подходящих вектора напряжения АВ и определяем вектора производных тока,
3. из них находим вектор с наименьшим фазовым рассогласованием с вектором  $\vec{\delta I}$ ,
4. проверяем сонаправленность вектора ЭДС сети и вектора  $\vec{\delta I}$ , если вектора сонаправлены, выбираем нулевое состояние АВ по критерию минимальных переключений,
5. если нет, выбираем вектор напряжения, который обеспечил вектор производной тока с наименьшим фазовым рассогласованием с вектором  $\vec{\delta I}$ .

Представленная на рис. 1 система АВ с предлагаемым регулятором тока была реализована в виде дискретной модели в Simulink. Качество работы регулятора оценивалась по таким показателям:

- частота коммутации ключей инвертора – среднее число переключений в единицу времени  $F_k$ ,

- среднеквадратичное значение ошибки тока (СКО)  $\delta = \sqrt{\left( \sum_1^n (\delta I_{\alpha i}^2 + \delta I_{\beta i}^2) \right) / (n-1)}$

- коэффициент гармоник в установившемся режиме  $K_r$ , измерялся блоком *Discrete Total Harmonic Distorsion*,

- коэффициента сдвига фаз  $\cos \varphi$  который вычислялся по формуле:

$$\cos \varphi = \cos \left( \sum_1^n (\arctg(E_{\beta i} / E_{\alpha i}) - \arctg(I_{\beta i} / I_{\alpha i}))^2 / (n-1) \right)$$

Модель просчитывалась при нескольких значениях периода дискретизации  $T$ . При моделировании были приняты такие допущения: частота питающего напряжения сети неизменна и равна 50 Гц, система напряжений симметрична, сопротивления и индуктивности фаз равны. В качестве параметров сети переменного тока использовались параметры трансформатора типа ТМ 25/10: сопротивление фазы вторичной обмотки  $R_T = 0,154$  Ом, индуктивность фазы вторичной обмотки  $L_T = 0,77$  мГн, линейное напряжение вторичной обмотки  $U_L = 380$  В. Индуктивность сетевого дросселя принята равной  $L_{др} = 0,0005$  Гн. Номинальный ток нагрузки  $I_H = 15$  А. Нагрузка представлена в виде источника тока. Знак тока определяет режим работы нагрузки: "+" - генераторный, "-" - двигательный. Величина емкости звена постоянного тока  $C = 5 \times 10^{-4}$  Ф. Емкость выбиралась из расчета 100 мкФ/кВт для двигателя 5 кВт. Напряжение в звене постоянного тока стабилизировалось на уровне  $U_d = 560$  В. Выход регулятора напряжения ограничен значением максимальной амплитуды фазного тока  $I_{\max \varphi} = 25$  А. Радиус ДО 2А. Результаты моделирования для различных типов регуляторов сведены в таблицу.

Предложенный РВРТ	T=5 мкс				T=10 мкс				T=20 мкс			
	СКО, А	$F_k$ , Гц	$K_r$	$\cos \varphi$	СКО, А	$F_k$ , Гц	$K_r$	$\cos \varphi$	СКО, А	$F_k$ , Гц	$K_r$	$\cos \varphi$
РВРТ	1,35	8350	0,09	0,99	2,05	6350	0,125	0,99	4,29	3500	0,25	0,98
РВРТ из [3]	2,42	8300	0,12	0,99	3,63	6300	0,16	0,99	6,57	3600	0,31	0,98
3-х фазный РРТ	1,59	8300	0,098	0,99	2,86	6300	0,15	0,99	5,06	3650	0,255	0,98

**Выводы.** Предложен релейно-векторный регулятор тока, обеспечивающий уменьшение числа коммутаций ключей АВ, повышающий точность регулирования тока и обеспечивающий уменьшение влияния периода дискретизации цифровой системы на точность регулирования тока.

#### Литература

- 1 Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: Монография. - Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470 с.
- 2 Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А., Зиновьев Г.С. Прогнозирующее релейно-векторное управление активным выпрямителем напряжения // Электротехника. 2001. №12. С. 47-52.
- 3 Якупов Д.В.. Обоснование алгоритма векторного релейного регулятора тока трехфазных автономных инверторов напряжения // Науковий вісник НГУ. 2004. № 1. С. 95-98.
- 4 Казачковский Н.Н., Якупов Д.В. Управление активным выпрямителем с релейно-векторным контуром тока для систем частотно-регулируемого электропривода // Ефективність та якість постачання промислових підприємств: VI міжнародна науково-технічна конф.: зб. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2008, С. 377-380.