

УДК 62-83:621.314:621.382

ПРОГНОЗИРУЮЩЕЕ РЕЛЕЙНО-ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМИ ТОКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

А. А. Ефимов^а, доктор техн. наук, профессор

В. Д. Косулин^а, канд. техн. наук, доцент

С. Ю. Мельников^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Цель: разработка структуры и синтез регуляторов системы автоматического регулирования активного токового двухзвенного преобразователя частоты, обеспечивающих повышение динамических показателей его работы. **Результаты:** на основе стратегии прогнозирующего релейно-векторного управления разработаны функциональная и структурная схемы системы автоматического регулирования активного токового двухзвенного преобразователя частоты, проведен синтез регуляторов сетевых токов и выходных напряжений преобразователя частоты. В соответствии с математическим описанием системы автоматического регулирования активного токового преобразователя частоты разработана в среде Delphi моделирующая программа, позволяющая анализировать энергетические и динамические показатели работы преобразователя. Представлены результаты математического моделирования и экспериментальных испытаний макетного образца преобразователя. **Практическая значимость:** использование в преобразователе частоты алгоритмов прогнозирующего релейно-векторного управления вместо алгоритмов широтно-импульсной модуляции позволяет упростить структуру системы автоматического регулирования. Разработанная процедура синтеза прогнозирующих релейно-векторных регуляторов является простой, хорошо адаптированной для микропроцессорной реализации. Разработанные алгоритмы управления обеспечивают существенное уменьшение реактивных элементов двухзвенного преобразователя частоты и повышение его динамических показателей работы.

Ключевые слова — активный преобразователь тока, прогнозирующее релейно-векторное управление, алгоритмы управления, широтно-импульсная модуляция, математическое моделирование.

Введение

Возрастающие масштабы использования полупроводниковых преобразователей различных типов, а также регулируемых электроприводов, увеличение их мощности вызывают заметное влияние преобразователей на показатели качества напряжений питающей сети. Основное внимание разработчиков устройств силовой электроники в настоящее время направлено на совершенствование алгоритмов управления традиционной схемой двухзвенного преобразователя частоты (ДПЧ), силовая часть которого выполнена по схеме «неуправляемый выпрямитель — автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ)», и на замену неуправляемого выпрямителя в составе ДПЧ на активный выпрямитель напряжения. Это во многом объясняется тем, что элементная база современных силовых полупроводниковых приборов и специализированных микроконтроллеров ориентирована именно на эти типы преобразователей.

Вместе с тем дальнейшее совершенствование силовых полупроводниковых приборов, появление полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей с односторонней проводимостью возрождают интерес к схемам ДПЧ, выполненных на базе автономного инвертора тока (АИТ). На начальном этапе развития преобразовательной техники схема автономного тиристорного инвертора с прямой коммутацией послужила

основой построения уникального класса стабилизированных преобразователей частоты с синусоидальным выходным напряжением, широко используемых в системах электроснабжения разделительных производств, обеспечивающих получение изотопов тяжелых веществ, а также создания систем бесперебойного электропитания. Новейшая элементная база силовой электроники, наличие специализированных микроконтроллеров, способных реализовать в реальном времени сложные импульсно-модуляционные алгоритмы управления простейшими силовыми схемами активных токовых преобразователей в целях повышения их энергетических показателей и улучшения динамических характеристик, ставят на повестку дня задачу развития и совершенствования активных токовых ДПЧ с синусоидальным выходным напряжением, изыскание возможностей их использования в традиционных областях (системах электроснабжения разделительных производств, гарантированного электропитания), а также расширение областей применения на системы общепромышленного регулируемого электропривода переменного тока [1].

Широко применяемые преобразовательные устройства, в основной массе своей тиристорные преобразователи с импульсно-фазовым управлением, являются нелинейными приемниками электрической энергии, потребляющими значительную реактивную мощность, зависящую от угла фазового отпирания вентилей, и создающими

еще весьма нежелательную мощность искажения, обусловленную несинусоидальной формой потребляемого (рекуперированного) тока. Наличие реактивной мощности и мощности искажения снижает коэффициент мощности преобразовательного устройства и регулируемого электропривода иногда до очень низких, недопустимых значений.

Интерес к активным токовым преобразователям в последние годы существенно возрастает [2–4]. Однако большинство работ посвящено анализу работы активных преобразователей в системах электроснабжения, в которых преобразователи работают, как правило, в режиме силового активного фильтра, и явно недостаточно внимания уделяется рассмотрению работы активных токовых преобразователей в составе ДПЧ, которые являются основой систем электропривода.

Целью работы является представление способа прогнозирующего релейно-векторного (ПРВ) управления и системы автоматического регулирования (САР) активного токового ДПЧ для электропривода, которые обеспечивают синусоидальные входные токи и выходные напряжения ДПЧ, качественные динамические характеристики, электромагнитную и энергетическую совместимость преобразователя с питающей сетью и нагрузкой.

Схема двухзвенного токового преобразователя частоты

Принципиальная схема активного токового ДПЧ (рис. 1) [1], являющегося предметом рассмотрения и объектом управления в данной работе, состоит из двух последовательно включенных силовых полупроводниковых преобразователей — активного выпрямителя тока АВТ и автономного инвертора тока АИТ, соединенных звеном постоянного тока, в котором устанавливается

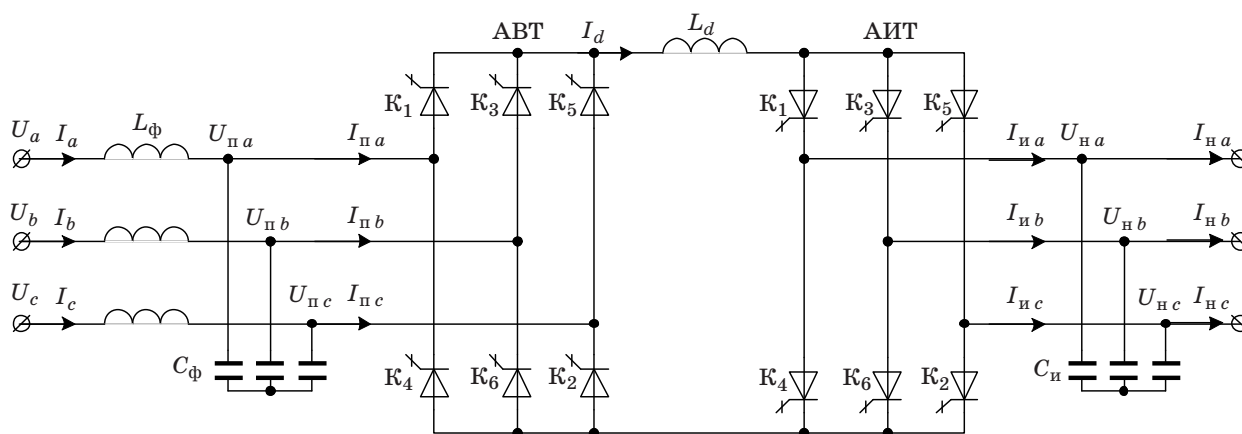
сглаживающий реактор L_d . Силовые схемы АВТ и АИТ выполняются на полностью управляемых ключах с односторонней проводимостью. На входе АВТ устанавливается сетевой LC-фильтр с параметрами L_ϕ , R_ϕ , C_ϕ , на выходе АИТ — емкостной фильтр C_n , параллельно которому подключается нагрузка, имеющая в общем случае активно-индуктивный характер с противо-ЭДС. В системах электропривода нагрузкой ДПЧ являются двигатели переменного тока.

Математическое описание АВТ в составе активного токового ДПЧ, а также результаты анализа и синтеза векторных САР с использованием алгоритмов синусоидальной и векторной ШИМ для подобного класса активных преобразователей представлены в работах [1, 5]. Была подтверждена возможность формирования качественной формы сетевого тока, регулирования входных коэффициентов сдвига и мощности с реализацией режима рекуперации энергии в сеть переменного тока.

Однако из-за высокой добротности сетевого LC-фильтра сетевые токи и выпрямленный ток имели значительные высокочастотные колебания, для устранения которых приходилось существенно усложнять систему регулирования, вводя демпфирующие обратные связи по производным сетевых токов. В результате проведенных исследований было установлено, что наиболее перспективным способом управления активными преобразователями является способ прогнозирующего релейно-векторного управления [1, 6], который и был использован в дальнейшем при синтезе САР активного токового ДПЧ.

Алгоритм ПРВ-управления сетевыми токами АВТ

Стратегия ПРВ-управления, относящегося к классу оптимальных прогнозирующих способов, предполагает наличие математической модели



■ Рис. 1. Схема трехфазного активного токового ДПЧ

объекта управления, определяющей полные векторы переменных состояния и возмущений, а также состав управляющих воздействий и их возможные значения. Кроме того, предварительно, на основе анализа модели, выбирается состав независимых координат, управляемых в рамках ПРВ-стратегии. На основе математической модели осуществляется прогноз поведения объекта на интервале управления Δt и определяются оптимальные значения управляющих воздействий, реализуемые на текущем интервале управления. В том случае, когда объектом управления является АВТ, содержащий полупроводниковый коммутатор (ПК) и сетевой LC-фильтр, управляющими воздействиями являются сигналы, поступающие на информационный вход АВТ I_c^* .

Прогнозирование осуществляется путем численного решения на интервале управления Δt (например, методом Эйлера, векторных уравнений сетевого LC-фильтра), которое в неподвижной координатной системе (α, β) записывается в виде

$$I_c = K_1 U_c^0 + K_2 I_c^0 + K_3 U_{\Pi}^0 + K_4 I_{\Pi}, \quad (1)$$

где $I_c, U_c, U_{\Pi}, I_{\Pi}$ — векторы сетевых токов, сетевых напряжений, напряжений на конденсаторах LC-фильтра, токов на силовом входе ПК соответственно; K_i — постоянные коэффициенты; индекс ноль относится к значениям переменных на начало интервала Δt .

Вектором воздействия считаем I_{Π} , который изменяется в связи с изменением состояний ключей ПК, управляемой переменной — вектор сетевых токов I_c . При Δt на порядок меньше периода собственных колебаний LC-фильтра K_i определяются по выражениям

$$K_1 = \frac{\Delta t}{L_{\Phi}}; K_2 = \frac{\Delta t}{L_{\Phi}} \left(-R_{\Phi} - \frac{\Delta t}{C_{\Phi}} \right) + 1; \\ K_3 = -\frac{\Delta t}{L_{\Phi}}; K_4 = \frac{\Delta t^2}{L_{\Phi} C_{\Phi}}. \quad (2)$$

Поиск управляющего воздействия может быть проведен методом прямого или обратного прогноза.

При прямом прогнозе по уравнениям (1), (2), последовательно перебирая все значения вектора тока I_{Π} на входе АВТ, находим единственный образующий вектор токов сети I_{c_i} , наиболее близкий к вектору задающего воздействия I_c^* . Индекс $i = 1, 2, \dots, 6$, 0 соответствует номеру образующих векторов АВТ, из которых шесть — ненулевых и один — нулевой [1].

Обратный прогноз осуществляется путем нахождения желаемого задающего вектора тока I_c^* на входе ПК при условии, что задача управления идеально решена в конце текущего интервала

управления, т. е. $I_c = I_c^*$. Тогда I_c^* в конце интервала управления Δt вычисляется по формуле

$$I_c^* = -\frac{C_{\Phi}}{\Delta t} U_c^0 + \left(1 + \frac{R_{\Phi} C_{\Phi}}{\Delta t} - \frac{L_{\Phi} C_{\Phi}}{\Delta t^2} \right) I_c^0 + \\ + \frac{C_{\Phi}}{\Delta t} U_{\Pi}^0 + \frac{L_{\Phi} C_{\Phi}}{\Delta t^2} I_c^{*0}. \quad (3)$$

По результатам обратного прогноза выбирается из всех реализуемых образующих векторов тока АВТ то значение вектора тока I_{Π} на силовом входе ПК, которое является наиболее близким для текущего интервала управления к рассчитанному желаемому задающему вектору I_c^* на управляющем входе. И на этом интервале реализуется соответствующее I_{Π} состояние ключей ПК.

Алгоритм ПРВ-управления выходным напряжением АИТ

Аналогичный подход был применен в случае, когда объектом управления является инвертор тока с выходным емкостным фильтром. Уравнение емкостного фильтра на интервале управления при использовании метода Эйлера в векторной форме в неподвижной координатной системе (α, β) записывается в виде

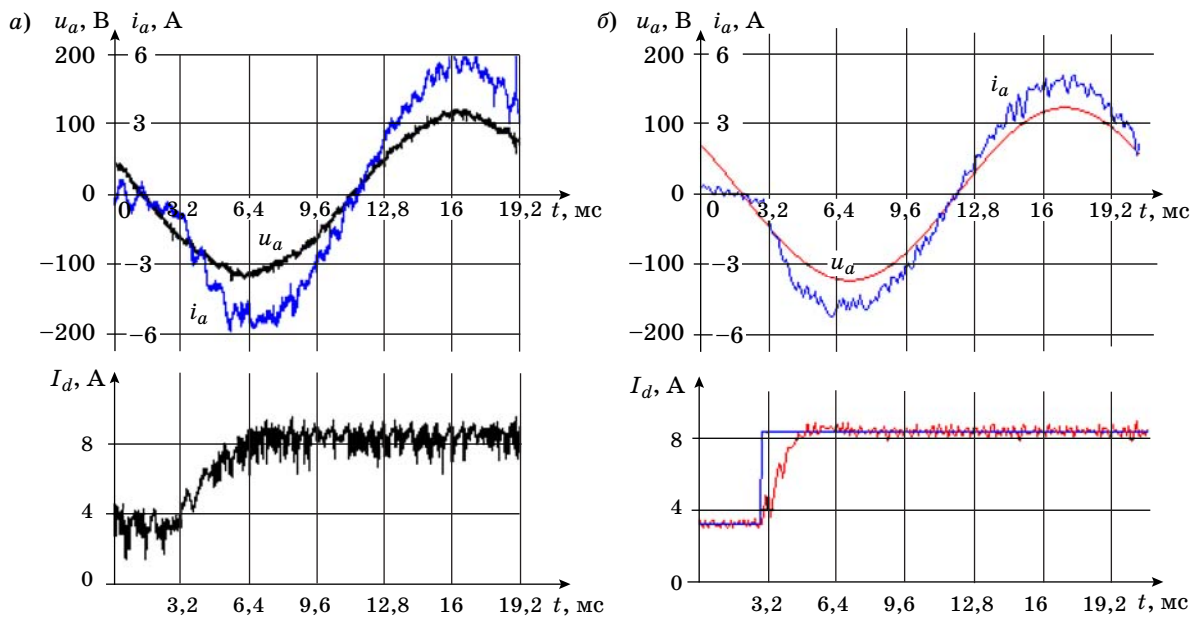
$$U_{\Pi} = U_{\Pi}^0 - \frac{\Delta t}{C_{\Pi}} I_{\Pi}^0 + \frac{\Delta t}{C_{\Pi}} I_{\Pi}, \quad (4)$$

где $U_{\Pi}, I_{\Pi}, I_{\Pi}$ — векторы напряжений нагрузки, токов нагрузки, токов на выходе ПК инвертора тока соответственно. Вектором воздействия считаем I_{Π} , управляемой переменной — вектор напряжений нагрузки U_{Π} . Индекс ноль относится к значениям переменных на начало интервала управления Δt . Поиск управляющего воздействия для инвертора тока может проводиться аналогично алгоритму ПРВ-управления сетевыми токами АВТ с использованием прямого или обратного прогноза.

Разработанные алгоритмы ПРВ-управления выпрямителя и инвертора были реализованы в двух специализированных сигнальных микроконтроллерах фирмы Texas Instruments TMS320F243, характеризующихся высоким быстродействием (по одному для АВТ и АИТ). Это существенно, так как длительность интервала управления Δt в разработанных алгоритмах примерно на порядок меньше периода ШИМ, используемой в традиционных алгоритмах управления преобразователями.

Система автоматического регулирования активного токового ДПЧ

На основе алгоритмов ПРВ-управления была синтезирована векторная САР ДПЧ, функциональная схема которой представлена на рис. 2.



■ **Рис. 4.** Фазные напряжение u_a и ток i_a , выпрямленный ток I_d при отработке задания на величину выпрямленного тока: *а* — эксперимент; *б* — моделирование

скачкообразное уменьшение задания до 176 В. Затем обрабатывалось обратное увеличение до первоначального задания. Осциллограммы показывают высокое качество переходных процессов. Входное, сетевое напряжение 220/380 В, частота 50 Гц, номинальное значение выходного напряжения 220/380 В, частота 400 Гц. Время отработки задания составило 3 мс. Также математическим моделированием и экспериментальными исследованиями макетного образца активного токового ДПЧ была доказана возможность его работы в составе частотно-управляемого асинхронного электропривода в диапазоне изменения выходной частоты и напряжения 1:10 без переключения величин емкостей АИТ. Параметры макета следующие: активное сопротивление реактора сетевого фильтра $R_\Phi = 0,1$ Ом, индуктивность реактора сетевого фильтра $L_\Phi = 1,5$ мГн, фазная емкость сетевого фильтра АВТ $C_\Phi = 20$ мкФ, индуктивность выходного фильтра АВТ $L_d = 15$ мГн, емкость на выходе АИТ $C_{\text{н}} = 1,2$ мкФ, силовые транзисторы IRG4PH50KD, в качестве последовательного диода в АВТ использовался обратный диод того же транзистора. Частота дискретизации $F_{\text{рег}} = 30$ кГц ($\Delta t = 33,3$ мкс).

Осциллограммы, иллюстрирующие работу макетного образца АВТ, представлены на рис. 4, *а*; результаты моделирования работы САР АВТ — на рис. 4, *б*.

По результатам моделирования коэффициент гармоник сетевого тока составил 10 %,

полученный экспериментально — 9 %. Время отработки скачка задания на выпрямленный ток составило 3 мс.

Заключение

Использование алгоритмов ПРВ-управления позволяет упростить структуру системы регулирования. Разработанная процедура синтеза ПРВ-регуляторов является достаточно простой, хорошо адаптированной для микропроцессорной реализации, а синтез пропорционально-интегральных регуляторов — традиционный, полностью идентичный таковому в системах подчиненного регулирования. Прогнозирование с учетом задержек, вносимых микропроцессорными системами регулирования, наиболее просто может быть реализовано при прямом прогнозе [1].

Возможности независимого формирования кривой выходного напряжения и регулирования его частоты при работе активного токового ДПЧ в режимах высокочастотных переключений обеспечивают существенное уменьшение реактивных элементов преобразователя и его применимость в системах частотно-управляемого электропривода при неизменных значениях емкостей выходного фильтра АИТ.

Активный выпрямитель тока в составе ДПЧ может успешно применяться для модернизации традиционных тиристорных электроприводов постоянного тока в целях повышения их динамических и энергетических показателей.

Литература

1. Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / НГТИ. — Новоуральск, 2001. — 250 с.
2. Волков А. В., Метельский В. П., Волков В. А. Совершенствование энергосберегающей системы электропитания для автоматизированных электроприводов на основе активного фильтра // Электротехнические и компьютерные системы. 2011. № 3. С. 388–391.
3. Волков А. В., Волков В. А. Компенсация посредством активного фильтра реактивной мощности и мощности искажений в четырехпроводной трехфазной сети // Электротехника. 2010. № 7. С. 41–51.
4. Tae-Won Chan, Hong-Hee Lee, Van Tang, Brovanov S. V. A Novel Control Strategy for a Tree-Phase Rectifier with High Power Factor and Stable Output Voltage // J. of Power Electronics. July 2007. Vol. 7. N 3. P. 203–212.
5. Шрейнер Р. Т., Ефимов А. А., Калыгин А. И. Математическое описание и алгоритмы ШИМ активных выпрямителей тока // Электротехника. 2000. № 10. С. 42–49.
6. Шрейнер Р. Т. и др. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными преобразователями частоты в системах электропривода переменного тока // Электротехника. 2004. № 10. С. 43–50.

UDC 62-83:621.314:621.382

Predictive Relay-Vector Control of Active Current Converters

Efimov A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, efa33@aanet.ruKosulin V. D.^a, PhD, Tech., Associate Professor, vdk.spb@mail.ruMelnikov S. Y.^a, PhD, Tech., Associate Professor, sburine@mail.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Structural development and synthesis of automatic control system regulators for an active two-unit current frequency converter improving the dynamic performance of its work. **Results:** On the basis of predictive relay-vector control strategy, functional and structural schemes of an automatic control system for an active two-unit current frequency converter were designed. Regulators of net currents and output voltages of the frequency converter were synthesized. In accordance with a mathematical description of an active current frequency converter's automatic control system, a simulation program was developed in Delphi, which analyzes the energetic and dynamic characteristics of the converter. The results of a mathematical simulation and experimental tests of a converter's mockup are presented. **Practical relevance:** Algorithms of predictive relay-vector control used in the frequency converter instead of pulse-width modulation algorithms can simplify the automatic control system structure. The proposed procedure of synthesizing predictive relay-vector regulators is simple and well-adapted to chip implementation. The control algorithms guarantee a considerable decrease in the reactive elements of the two-unit frequency converter and an increase in its dynamic performance.

Keywords — Active Current Converter, Predictive Relay-Vector Control, Control Algorithms, Pulse-Width Modulation, Mathematical Modeling.

References

1. Efimov A. A., Schreiner R. T. *Aktivnyye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka* [The Active Converters in Alternative Electric Drivers]. Novouralsk, NSTU Publ., 2001. 250 p. (In Russian).
2. Volkov A. V., Metel'skii V. P., Volkov V. A. Improving the Energy-Saving Power Supply System for Automated Electric Drivers Based Active Filter. *Elektrotehnicheskie i kompiuternyye sistemy*, 2011, no. 3, pp. 388–391 (In Russian).
3. Volkov A. V., Volkov V. A. Compensation Through the Active Filter of Reactive Power and Power Distortion in Three-Phase Network. *Elektrotehnika*, 2010, no. 7, pp. 41–51 (In Russian).
4. Tae-Won Chan, Hong-Hee Lee, Van Tang, Brovanov S. V. A Novel Control Strategy for a Tree-Phase Rectifier with High Power Factor and Stable Output Voltage. *Journal of Power Electronics*, July 2007, vol. 7, no. 3, pp. 203–212.
5. Schreiner R. T., Efimov A. A., Kalygin A. I. Algorithms and Mathematical Description of the Active PWM Rectifiers. *Elektrotehnika*, 2000, no. 10, pp. 42–49 (In Russian).
6. Schreiner R. T., Efimov A. A., Zinoviev G. S., Koryukov K. N., Muhamatshin I. A., Kalygin A. I. Predictive Ladder Vector Control Frequency Converters Active in the AC Drive Systems. *Elektrotehnika*, 2004, no. 10, pp. 43–50 (In Russian).