

УДК 62–83:621.313

**ВЫСОКОДИНАМИЧНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ «МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ»  
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ НА БАЗЕ  
СИГНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ****А.А. Кромм<sup>1</sup>, Г.М. Симаков<sup>2</sup>, А.Е. Гусев<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Linde Material Handling GmbH*<sup>2</sup>*Новосибирский государственный технический университет*

В статье рассматриваются особенности анализа и синтеза системы высокودинамичной компенсации «мертвого времени» (МВ) в контуре тока двигателей, запитанных от транзисторных широтно-импульсных преобразователей. В первой части работы приведен краткий анализ существующих технических решений, алгоритмы которых не предполагают изменений или дополнений в силовой части привода, а следовательно, реализуемы с исключительно программными средствами. Показано, что наиболее современными и перспективными можно считать методы адаптивной компенсации с применением, например, эталонных моделей объекта управления. В работе предложена беспоисковая адаптивная система компенсации «мертвого времени», обеспечивающая в контуре тока электродвигателя сигнальную самонастройку, причем компенсация МВ основана не на линеаризации или корректировке нелинейных эффектов и задержек широтно-импульсного преобразователя, а на парировании возмущающих воздействий и помех, обусловленных негативным влиянием «мертвого времени». Особое внимание при работе над статьей уделялось практической направленности предложенного решения, поэтому рассмотренный алгоритм базируется, исключительно, на основных, проверенных практикой, принципах теории управления. Данный подход позволяет обеспечить не только прозрачность теоретических рассуждений, изложенных в статье, но и сократить временные затраты на анализ и синтез контура тока, цель которых в конечном счете – оптимизация высокоточных приводов. С отсутствием итерационных методов математики редуцируются ресурсы микропроцессорных блоков управления, что делает данный метод еще более привлекательным в низкочастотных приводах, не претендующих на «эксклюзивность» интегральной схемотехники. Предложенный алгоритм был интегрирован в уже существующий контур тока асинхронного электропривода с векторным управлением, который доказал высокую эффективность статической и динамической компенсации не только МВ преобразователя, но и связанных с ним трудноанализируемых нелинейных эффектов. Адаптивная компенсация в сравнении с компенсацией МВ по принципу вольтодобавки позволила увеличить коэффициент полезного действия электрического привода на низких частотах вращения двигателя, а также уменьшить пульсации вращающего момента. Приведена осциллограмма фазного тока реального асинхронного электропривода с компенсацией МВ по принципу параметрической вольтодобавки как наиболее распространенной на практике, а также осциллограмма тока с адаптивным компенсационным воздействием по принципу, рассмотренному в данной статье.

*Ключевые слова:* широтно-импульсный преобразователь, «мертвое время», компенсация, эталонная модель, сигнальная самонастройка, пространство состояний, пример применения, осциллограммы тока.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-16-28

**Введение**

Точность воспроизведения задающего воздействия в приводах переменного тока с ШИМ-преобразователями зависит от многих факторов, перечисление которых в одной статье невозможно. Однако известно, что наибольшее влияние на качество управляющих воздействий в канале ШИМ оказывает наличие пауз

между интервалами управляемости полупроводников преобразователя [1-4], которое часто называется «мертвым временем» или бестоковыми паузами. Введение таких пауз необходимо для исключения коротких замыканий источника питания через фазы инвертора при коммутации комплементарной пары транзисторов. Следует отметить важнейшие недостатки приводов переменного тока с ШИМ, в случае отсутствия компенсации бестоковых пауз:

- искажение желаемой формы тока двигателя;
- ухудшение гармонического состава тока двигателя, которое приводит к увеличению потерь в приводе;
- неравномерность вращения электрического двигателя привода, особенно при малых частотах вращения;
- на низких оборотах двигателя возможны значительные вибрации и дополнительные акустические шумы. Вибрации двигателя могут привести к нарушению изоляции обмоток двигателя и выходу их из строя;
- нелинейная характеристика звена «мертвого времени» часто нарушает устойчивость систем управления и привода в целом, например, вследствие недопустимых пульсаций вращающего момента двигателя.

Причиной вышеуказанных недостатков является отклонение преобразованного напряжения от желаемого (заданного) вследствие негативного воздействия МВ. Величину относительного отклонения преобразованного напряжения можно оценить по зависимости, приведенной в [1]:

$$\Delta \hat{u}_1 = \frac{\Delta U_i}{U^*} = \frac{2 \tau U_0}{U^*} \text{sign}(i), \quad (1)$$

где  $\Delta \hat{u}_1$  – относительное отклонение выходного напряжения от заданного;  $\Delta U_i$  – абсолютное отклонение напряжения от заданного;  $U^*$  – среднее значение выходного напряжения преобразователя;  $U_0$  – напряжение в звене постоянного тока;  $\tau$  – относительная длительность одной коммутации комплементарной пары транзисторов;  $\text{sign}(i)$  – знак направления тока в нагрузке.

При малых значениях задающего воздействия (напряжений) относительная погрешность воспроизведения может составить  $\pm 40\%$  [1]. Такое рассогласование между заданным и истинным напряжением в современных приводах неприемлемо и требует обязательной компенсации «мертвого времени» (КМВ). Чем точнее привод, тем более высокие требования предъявляются к КМВ.

В отечественной и зарубежной технической литературе достаточно много теоретических исследований, направленных на повышение качества компенсации «мертвого времени». Особенный интерес, конечно, представляют решения, не требующие изменений и дополнений в силовой части привода и, следовательно, реализуемые исключительно программными средствами. В случае реализации КМВ программным продуктом наиболее часто на практике используются два метода: первый из которых формирует компенсирующий сигнал через параметрическую вольтдобавку, модуль которой рассчитывается одним из «жестких» алгоритмов, а знак определяется направлением тока нагрузки. При втором способе компенсация производится адаптивными алгоритмами без «прямого» расчета корректирующего воздействия.

К первому способу можно отнести решения, описанные в [1–3]. Например, в [1] предлагается формировать компенсирующее воздействие ( $u_k$ ) с учетом выражения

$$u_k = 2 \tau U_0 \text{sign}(i),$$

которое позволяет идеально компенсировать МВ в случае его полного совпадения с описанием (1). В [2] приводится общее исследование выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) с учетом его нелинейных эффектов, а также сформулированы рекомендации по применению параметрической компенсации. Наряду с негативным влиянием МВ на выходное напряжение преобразователя в работе исследуется проблема непостоянства падения напряжения на транзисторах ШИП, которая приводит к дополнительным искажениям токов и моментов привода. В работе показано, что спектральные характеристики момента позволяют оценивать влияние нелинейностей инвертора на конечную точность замкнутой системы управления электропривода, с учетом которых варьируется амплитуда компенсационного воздействия параметрической КМВ, и тем самым минимизируется негативное влияние нелинейностей.

Один из модифицированных способов КМВ, реализующий амплитудно-фазовую вольтдобавку с учетом заданного положения вектора напряжения ШИП, предложен в [3]. Так, на рабочей частоте ШИМ формируется вектор компенсационного напряжения статора с заданной амплитудой и фазой. Разработаны алгоритм и методика настройки пофазной компенсации «мертвого времени», обеспечивающие высокую точность формирования желаемого напряжения статора. Авторы утверждают, что применение указанной методики позволило достичь погрешности электромагнитного момента не более 5 % во всех рабочих режимах электропривода, включая зоны глубокого регулирования скорости.

Не углубляясь в дальнейший анализ достоинств и недостатков вышеуказанных решений, следует отметить два основных недостатка параметрической КМВ, ограничивающих ее массовое применение на практике: недостаточная точность компенсационных алгоритмов вследствие необходимости использования измеренных величин, а также трудоемкость оптимизации настроек привода при попытке линеаризовать нелинейные характеристики ШИП. Кроме того, практический анализ МВ требует, как правило, многочисленных допущений, реализация которых в приводе трудновыполнима или нереальна. Так, например, в [4] исследован и рекомендован к применению метод компенсации МВ на базе вольтдобавки со следующими допущениями:

- падение напряжения на открытом ключе пренебрежимо мало;
- импульсы управления имеют идеальные фронты;
- переход между включенным и выключенным состоянием ключа определяется фиксированными значениями;
- напряжение звена постоянного тока постоянно.

Учитывая вышесказанное, несложно представить трудоемкость практической реализации вышеупомянутых параметрических КМВ, если бы одну из них пришлось реализовать в прецизионных приводах.

Устранить указанные недостатки позволяют системы КМВ, использующие современную теорию и практику адаптивных систем. Классическим примером реализации адаптивных систем КМВ являются системы с эталонной моделью объекта по принципу «Smith predictor», где в токовый контур привода вводится идеализированная модель объекта, дополнительная модель, описывающая поведение МВ в ШИП, а также фильтр подавления помех. Рассогласование координат идеализированного и реального объекта является базисным сигналом компенсации МВ, поступающего совместно с обратной связью по току на вход регулятора тока. Концепт, достоинства и примеры практической реализации такой КМВ подробно описаны в [5–9]. Например, в [5, 6] отмечается, что предиктор Смита является эффективным инструментом для управления системами с запаздыванием (к которому можно отнести ШИП с МВ), однако его использование требует точной оценки

параметров объекта управления и транзитной задержки МВ. Модификации предиктора Смита, направленные на оптимизацию систем КМВ, трудоемки [8, 9] и не всегда эффективны на практике [8].

Следующие недостатки КМВ с использованием предиктора Смита значительно ограничивают массовое применение данного метода в электроприводах:

- присутствие наряду с блоком эталонной модели таких нестационарных звеньев, как модель транзитной задержки, описывающей МВ;
- так как сигнал рассогласования между реальным объектом и предиктором Смита суммируется с сигналом обратной связи по току и поступает на вход регулятора, невозможно в системе управления разделить движения на управляющие и компенсирующие;
- фильтр помех, параметры которого зачастую требуют изменений в процессе регулирования координат привода;
- большое количество параметров в системе, требующих их оптимизации в процессе наладки привода.

### **Цель работы**

Целью работы является разработка концепции, анализа и синтеза высокودинамической системы компенсации «мертвого времени» широтно-импульсного преобразователя в контуре тока электродвигателя на базе беспойсковых адаптивных систем с исключительно одной эталонной моделью, причем негативное влияние МВ рассматривается не как процесс нелинейного искажения или задержки формирования желаемого напряжения в преобразователе, а как «классическое» возмущающее воздействие на выходе преобразователя, приложенное к контуру тока. Эффективность метода предлагается оценить по таким показателям, как форма фазового тока двигателя, коэффициент полезного действия электропривода при малых частотах вращения и амплитуда пульсаций вращающего момента двигателя. Базисом для сравнения выбран привод с компенсацией «мертвого времени» по принципу вольтодобавки, приведенной в [1]. Рассмотренный в статье метод компенсации МВ ориентирован на практическое применение, поэтому минимизация параметров и настроек является также целью работы.

### **Теоретическая часть**

Постановка задачи:

- компенсация «мертвого времени» должна осуществляется в электроприводах постоянного и переменного тока с явно выраженным контуром тока, охваченного отрицательной обратной связью;
- для анализа и синтеза системы КМВ предполагается использовать идеи и методы адаптивных систем с эталонными моделями. Приоритетной является сигнальная адаптация как наиболее «прозрачная» при практической реализации. Эталонная модель не должна содержать нелинейных и нестационарных звеньев;
- необходимо доказать целесообразность использования сигнальной адаптации для приводов с ШИП, так как данная адаптация, согласно теории построения таких систем, может оказаться чувствительной к возмущающим воздействиям и помехам (такое доказательство особенно важно с точки зрения тезиса о представлении МВ внешним возмущающим фактором в контуре тока);
- анализ и синтез системы КМВ должны осуществляется в рамках теории беспойсковых систем, в моделях которых параметры стационарны, но в объекте управления допустимо присутствие «медленно» меняющихся параметров;

– алгоритм КМВ должен без труда интегрироваться в привод с микропроцессорным управлением, обеспечивая при этом инвариантность к скалярному или векторному управлению. Изменения или дополнения схмотехнических решений силовой части привода исключаются;

– алгоритм КМВ предполагается использовать в оптимизированных по стоимости микропроцессорах, не обладающих «сверхресурсами»;

– результаты предложенной КМВ необходимо сравнить с результатами уже существующих решений, например, реализуемыми методами параметрической компенсации.

Анализ и синтез токового контура с адаптивной КМВ, как было упомянуто выше, предлагается осуществить на базе теории и практики адаптивных систем с явной эталонной моделью, которая успешно применялась и продолжает применяться в современных системах управления [10–12]. Ниже будет проверено предположение, что система с эталонной моделью и сигнальной адаптацией в контуре регулирования тока обеспечит простую и эффективную на практике компенсацию МВ.

Для обеспечения сигнальной самонастройки в контуре тока электропривода воспользуемся беспоисковой адаптивной системой, описанной в [10] и представленной на рис. 1, где  $X(s)$  – сигнал задания тока двигателя;  $Y(s)$  – сигнал, соответствующий истинному току статора двигателя;  $W_m(s)$  – передаточная функция эталонной модели;  $W_r(s)$  – передаточная функция регулятора тока ШИП;  $W_o(s)$  – передаточная функция объекта управления;  $K(s)$  – передаточная функция корректирующего звена;  $K_0$  – коэффициент обратной связи по току.

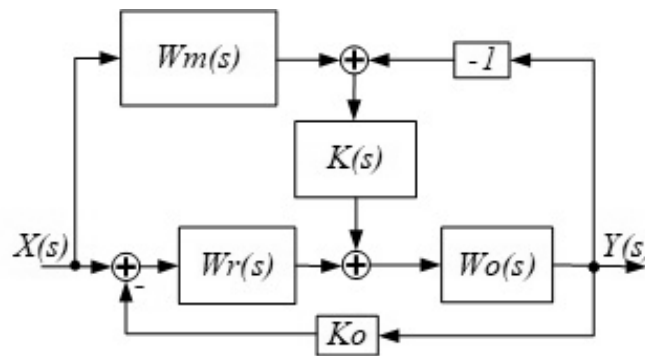


Рис. 1 – Структурная схема контура тока электропривода с эталонной моделью

Fig. 1 – Block diagram of the electric drive current loop with a reference model

В процессе функционирования системы (независимо от наличия или отсутствия МВ) параметры эталонной модели не изменяются и соответствуют значениям, при которых переходные процессы в модели близки к желаемым переходным процессам в системе управления в целом. Возможность использования самонастройки при выбранных параметрах контура тока целесообразно показать с помощью структурных преобразований. Первым этапом свернем контур с передаточными функциями  $W_o(s)$ ,  $K(s)$  и единичной обратной связью, предварительно перенеся сумматор за блок  $K(s)$ :

$$W_o'(s) = \frac{W_o(s)}{W_o(s)K(s)+1}$$

и, заменяя передаточную функцию  $K(s)$  теоретически бесконечным коэффициентом усиления  $K \rightarrow \infty$ , передаточную функцию замкнутой системы можно приблизительно заменить передаточной функцией модели:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} \approx W_m(s)K(s)W_o'(s) = \frac{W_m(s)K(s)W_o(s)}{W_o(s)K(s)+1} \approx W_m(s).$$

Реализуя таким образом адаптацию в контуре тока, поставим вопрос: какой степени компенсации МВ следует ожидать в данной системе, если влияние «мертвого времени» рассматривается как возмущающее воздействие с варьируемой амплитудой и ограниченным коэффициентом  $K$ ? Для разрешения данного вопроса структурную схему контура тока на рис. 1 целесообразно представить в обобщенном виде на рис. 2, воспользовавшись математическим аппаратом метода переменных состояний [13, 14] с явно выделенным вектором возмущения.

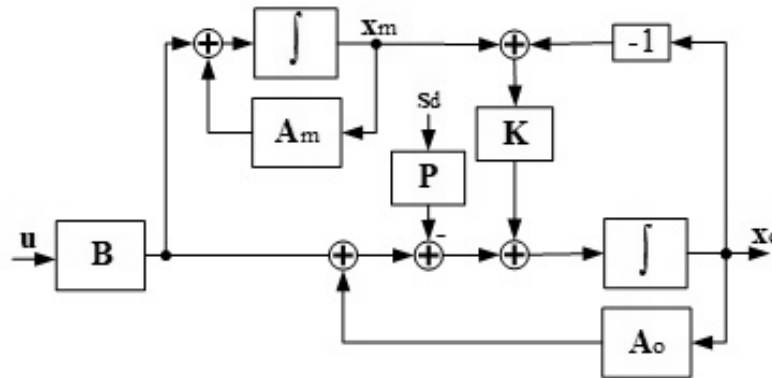


Рис. 2 – Обобщенная структурная схема контура тока электропривода с эталонной моделью и приложенным вектором возмущения  $s_d$

Fig. 2 – A generalized block diagram of the drive current loop with a reference model and an applied disturbance vector  $s_d$

В структурной схеме контура тока приняты следующие обозначения:  $u$  – вектор управляющих воздействий;  $x_o$  – вектор выходных координат системы;  $A_m$ ,  $A_o$  – матрицы параметров модели и объекта;  $B$ ,  $K$  – матрицы управляющих и корректирующих воздействий,  $s_d$  – вектор возмущений;  $P$  – матрица конфигураций всех возмущений, включая негативное воздействие МВ. (Замечание: матрицы  $D$  и  $C$  [12, 13], формирующие выходные координаты системы управления, в данной структурной схеме определены как  $D_m = D_o = 0$ ,  $C_m = C_o = \text{diag}(1, \dots, 1)$  и соответственно на рисунке 2 не представлены.)

Для оценки степени парирования возмущений в структуре на рис. 2 следует рассмотреть рассогласование переменных состояний  $\Delta x = K^{-1}Ps_d$  как функцию следующих переменных:

$$\Delta x = F(x_o, \dot{x}_o, s_d, u)$$

и, требуя условия  $\Delta \mathbf{x} \rightarrow 0$  (если, конечно, оно выполнимо) осуществить синтез коэффициентов матрицы  $\mathbf{K}$ . В случае идеального результата  $\Delta \mathbf{x} = 0$  парирование возмущений системой абсолютно.

Итак, исходные уравнения системы регулирования относительно производных переменных состояний модели и объекта:

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{B} \mathbf{u}, \quad \dot{\mathbf{x}}_o = \mathbf{A}_o \mathbf{x}_o + \mathbf{B} \mathbf{u} - \mathbf{P} \mathbf{s}_d + \mathbf{K}(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_o). \quad (2)$$

Записывая второе уравнение из (2) для отклонений выходных координат модели и объекта  $\Delta \mathbf{x}$ :

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1}(\dot{\mathbf{x}}_o - \mathbf{A}_o \mathbf{x}_o - \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{P} \mathbf{s}_d), \quad (3)$$

можно заметить, что коэффициенты элементов матрицы  $\mathbf{K}$  редуцируют не только векторы  $\dot{\mathbf{x}}_o$ ,  $\mathbf{A}_o \mathbf{x}_o$ ,  $\mathbf{B} \mathbf{u}$ , но и вектор приложенных возмущений  $\mathbf{P} \mathbf{s}_d$ . В чисто теоретическом случае, при котором матрица  $\mathbf{K}$  имеет бесконечные коэффициенты  $k_{n,m} \rightarrow \infty$ , выходные координаты модели и объекта во всех режимах привода идентичны ( $\Delta \mathbf{x} = 0$ ) и, как следствие, инвариантны к влиянию вектора  $\mathbf{P} \mathbf{s}_d$ , а значит и к негативному влиянию «мертвого времени» преобразователя. Таким образом, безынерционное корректирующее звено в виде матрицы  $\mathbf{K}$  помогает решить две задачи: обеспечить прецизионную самонастройку в системе с эталонной моделью и также редуцировать возмущения, приложенные к контуру тока.

Для дальнейшей оценки степени парирования возмущений в предложенной КМВ целесообразно перевести систему в установившийся режим, при котором выполняется условие  $\dot{\mathbf{x}}_m = \dot{\mathbf{x}}_o = 0$ . В этом случае уравнение (3) запишется в упрощенном виде:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{P} \mathbf{s}_d - (\mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{A}_o \mathbf{x}_o)). \quad (4)$$

Учитывая, что в адаптивной системе с глубокими обратными связями разница векторов  $\mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{A}_o \mathbf{x}_o$  весьма мала, выражение (4) трансформируется в еще более простое:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{P} \mathbf{s}_d. \quad (5)$$

Из последнего уравнения определение степени парирования возмущений для реальных коэффициентов (элементов) матрицы  $\mathbf{K}$  не представляет труда. Простым примером может быть оценка степени парирования негативного воздействия МВ, соответствующая величине абсолютного отклонения преобразованного напряжения преобразователя  $\Delta U_i$  от заданного, рассмотренного в (1). В этом случае уравнение (5) вырождается в скалярное:

$$\Delta x = 2\tau U_0 \text{sign}(i) / k_{om} = \pm \Delta U_i / k_{om},$$

где  $k_{om}$  – коэффициент усиления рассогласования координат модели и объекта (трансформированная в скаляр матрица  $\mathbf{K}$ ). Матрица  $\mathbf{P}$  также трансформированная, тождественно равна  $\mathbf{P} \equiv 1$ , что соответствует только одной точке приложения МВ, как возмущения.

### Экспериментальные исследования

Для пояснения практического применения предложенного метода целесообразно вернуться к рис. 1. Допустим, объект в контуре тока описывается аperiodи-

ческим звеном с передаточной функцией, наиболее часто применяемой в практике построения электроприводов:

$$W_o(s) = \frac{k_{mot}}{T_{mot}s + 1},$$

где  $W_o(s)$  – передаточная функция объекта;  $T_{mot}$  – электромагнитная постоянная времени двигателя;  $k_{mot}$  – коэффициент усиления двигателя по току;  $s$  – оператор Лапласа.

Следуя идее беспоисковых адаптивных систем, передаточные функции и параметры эталонной модели  $W_m(s)$  должны быть идентичными передаточной функции и параметрам объекта управления  $W_o(s)$ . Элементы матрицы **K** выбираются достаточно большими. Так как в рассматриваемом случае объект описывается дифференциальным уравнением первого порядка, то матрица **K** трансформируется в скаляр, как было показано выше. Регулятор тока может быть стандартным, например, ПИД-регулятором. Управляемость предложенного контура тока может быть проверена критериями управляемости систем, изложенными, например, в [13, 14].

Разработка предложенной адаптивной КМВ с последующей ее имплементацией в контур тока уже существующего асинхронного привода позволила существенно улучшить качество фазного тока двигателя, вид которого представлен на рис. 3.

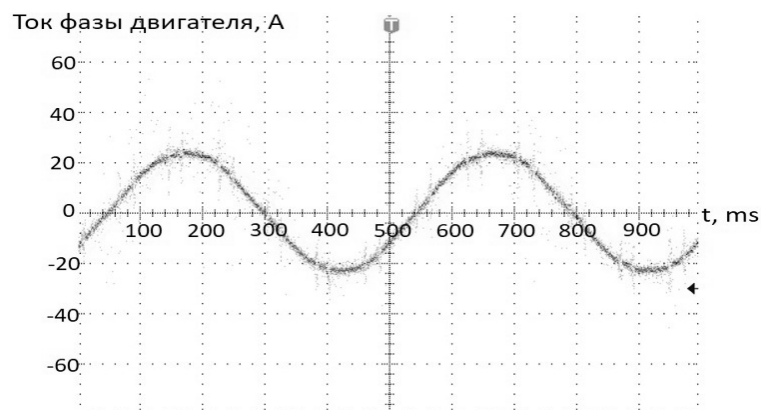


Рис. 3 – Осциллограмма фазного тока асинхронного двигателя с адаптивной компенсацией МВ

Fig. 3 – Waveform of the phase current of an induction motor with MV adaptive compensation

На рис. 4 представлена для сравнения осциллограмма фазного тока того же асинхронного двигателя с компенсацией МВ по принципу параметрической вольтодобавки, изложенной в [1]. Недостаточная точность корректирующего воздействия является основным препятствием ее применения в прецизионных приводах, так как данный способ требует точного измерения пульсирующего напряжения в звене постоянного тока и учета знака тока двигателя.

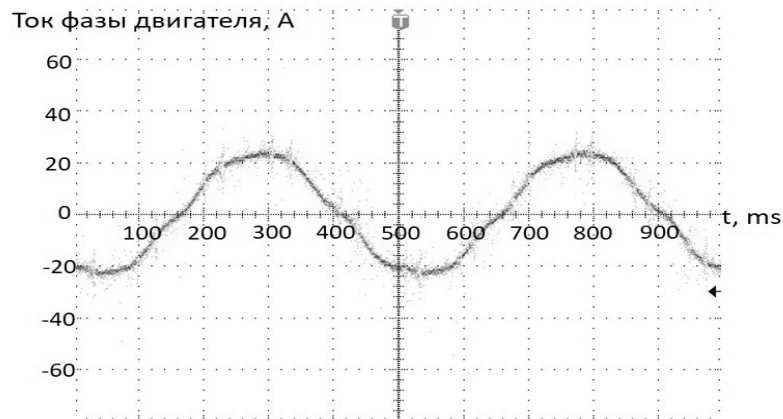


Рис. 4 – Осциллограмма фазного тока асинхронного двигателя с компенсацией МВ по принципу параметрической вольтдобавки

Fig. 4 – Oscillogram of the phase current of an induction motor with MV compensation according to the principle of parametric voltage boost

Улучшенное качество фазного тока двигателя позволило в сравнении с компенсацией МВ по принципу вольтдобавки уменьшить пульсации вращающего момента двигателя, обеспечить большую стабильность вращения двигателя при малых оборотах, а также увеличить коэффициент полезного действия электрического привода.

### Заключение

1. Предложенная методика высокودинамичной компенсации МВ использует опыт построения современных адаптивных систем, причем МВ представлено «классическим» возмущающим воздействием, приложенным к контуру тока, парирование которого осуществляется на базе безынерционной коррекции выходных сигналов объекта и эталонной модели, являющейся составной частью сигнальной самонастройки.

2. Предложен вариант анализа высокودинамичной компенсации МВ, позволяющий в статических режимах привода с достаточно высокой точностью оценить степень парирования возмущений, вызванных МВ. При оценке используется простое алгебраическое выражение в векторно-матричной форме. На основе практических результатов можно заключить, что допущения, сделанные при анализе КМВ, целесообразны и обоснованы.

3. Нелинейности преобразователя, например, связанные с непостоянством величины падения напряжения на открытых транзисторах или разбросом дифференциальных падений напряжений по всей «ветви» вольт-амперных характеристик транзисторов, значительно редуцируют свое негативное влияние на формирование желаемого тока привода посредством коррекции рассогласования сигналов объекта и эталонной модели.

4. Предложенный алгоритм предпочтителен в оптимизированных по стоимости приводах, так как его программное обеспечение не требует эксклюзивных ресурсов блоков управления. Так, например, в низкобюджетном микропроцессоре с тактовой частотой 100 МГц время вычисления предложенного алгоритма составляет не более 1,2 мкс при реализации его во вращающейся системе координат векторного управления приводом.

5. Сравнение кривых фазного тока (рис. 3 и 4) позволяет сделать вывод о высокой точности компенсационного алгоритма, и, следовательно, о допустимости представления МВ классическим возмущающим воздействием в контуре тока. Тестирование КМВ проводилось в приводе со значительными пульсациями напряжения в звене постоянного тока, преднамеренно запитанного от аккумуляторной батареи малой емкости.

6. Алгоритм предложенного метода КМВ не ухудшает прецизионность воспроизведения желаемых управляющих воздействий, так как, во-первых, разделены каналы управления и компенсации, и во-вторых, отпадает необходимость «прямого» учета направления (знака) тока. Известно, что при учете знака тока необходимо введение дополнительных нелинейных элементов, например, устраняющих «дребезг нуля» [15].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Шрейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
2. Искажение выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя прецизионного электропривода / В.С. Томасов, С.Ю. Ловлин, С.А. Тушев, Н.А. Смирнов // Вестник ИГЭУ. – 2013. – № 1. – С. 84–87.
3. Методика настройки измерительных каналов электропривода переменного тока с высоким качеством регулирования переменных / А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов, Н.А. Глебов, С.В. Журавлев // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», г. Екатеринбург, 05–09 октября 2015 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2015. – С. 55–58.
4. **Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Дымко С.С.** Исследование влияния мертвого времени в преобразователях частоты // Труды Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Современные проблемы электро-энерготехники и автоматики». – Киев: Политехника, 2009. – С. 35–38.
5. **Бураков М.В., Коновалов А.С.** Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 4. – С. 25–34. – DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.4.25.
6. **Schmirgel H., Krah J.O., Berger R.** Delay time compensation in the current control loop of servo drives – higher bandwidth at no trade-off // PCIM Europe Proceedings. – Nürnberg, Germany, 2006. – P. 541–546.
7. **Klarenbach C., Schmirgel H., Krah J.O.** Design of fast and robust current controllers for servo drives based on space vector modulation // PCIM Europe. – Nürnberg, Germany, 2011. – P. 182–188.
8. Predictive control for a permanent magnet synchronous motor using automatic tuning Smith-predictor with optimal parameter mismatch / Q. Zhang, A. Shen, Q. Tong, H. Qin // 2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. – Wuhan, China, 2008. – P. 1520–1525.
9. Patent EP No. WO2011120689A1. Entkopplung der Regelgrößen in einem Fluidfördersystem mit Totzeit / J. Kiesbauer, D. Vnucce, J. Fuchs, U. Königorski. – 2011.
10. **Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.** Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 382 с.
11. **Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В.** Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
12. **Лебедев А.В., Филаретов В.Ф.** Самонастраивающаяся система с эталонной моделью для управления движением подводного аппарата // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 5. – С. 42–52.
13. **Schroeder D.** Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen. – Berlin: Springer, 2009. – 1336 p. – DOI: 10.1007/978-3-540-89613-5.

14. Сю Д., Мейер А. Современная теория автоматического управления и ее применение / под ред. Ю.И. Топчиева. – М.: Машиностроение, 1972. – 544 с.
15. Patent Germany No. DE102012111696A1. Verfahren und Vorrichtung zur Totzeitkompensation / Lamsahel H., Zehringer T., Sworowski E. – 2014.

## HIGHLY DYNAMIC "DEAD TIME" COMPENSATION IN ELECTRIC DRIVES BASED ON SIGNAL ADAPTATION

**Kromm A.A.<sup>1</sup>, Simakov G.M.<sup>2</sup>, Gusev A.E.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Linde Material Handling GmbH, Aschaffenburg, Germany*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The article discusses the analysis and synthesis of a system of highly dynamic "dead time" compensation in the current loop of motors powered from transistor pulse-width converters. The first part of the paper provides a brief analysis of existing technical solutions, whose algorithms do not imply changes or additions to the power part of the drive and therefore are implemented exclusively by software. It is shown that the most modern methods of adaptive compensation can be considered using reference models of the control object. A non-search adaptive dead-time compensation system is proposed in the paper which provides signal self-tuning in the motor current loop, and dead-time compensation is based not on linearization or correction of nonlinear effects and delays of a pulse-width converter, but on parrying disturbing influences caused by the negative effects of "dead time". Particular attention is paid to the practical orientation of the proposed solution; therefore, the considered algorithm is based solely on the basic principles of the control theory proven by practice. This approach allows us to ensure not only the transparency of the theoretical arguments presented in the article, but also reduce the time spent on the analysis and synthesis of the current loop, the purpose of which, ultimately, is the optimization of high-precision drives. With the absence of iteration methods of mathematics, the resources of microprocessor control units are minimized, which makes this method even more attractive in low-budget drives that do not claim to "exclusivity of integrated circuitry. The proposed algorithm was integrated into the existing current loop of an asynchronous electric drive with vector control, which proved the high efficiency of static and dynamic compensation of not only the "dead time" of the converter, but also of the non-linear effects associated with it that are difficult to analyze. The adaptive "dead time" compensation increased the efficiency of the electric drive at low motor speeds, compared to voltage boost compensation, by approximately four percent, and also reduced the motor torque ripple by about seventeen percent. An oscillogram of the phase current of a real drive with "dead time" compensation is given according to the principle of parametric voltage addition, which is the most common in practice, as well as a waveform of current with adaptive compensation action according to the principle considered in this article.

**Key words:** with pulse-width converter, «dead time», compensation, reference model, self-tuning principle, state space, example of application, waveforms of current.

DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-16-28

## REFERENCES

1. Shreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of alternating current electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg, URO RAN Publ., 2000. 654 p.
2. Tomasov V.S., Lovlin S.Ju., Tushev S.A., Smirnov N.A. Iskazhenie vykhodnogo napryazheniya shirotno-impul'snogo preobrazovatelya pretzionnogo elektroprivoda [Output voltage distortion of pulse width converter of precision electric drive]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2013, no. 1, pp. 84–87.

3. Vinogradov A.B., Gnezdov N.E., Glebov N.A., Zshuravlev S.V. [A technique for setting up the measuring channels of an AC electric drive with a high quality of variable regulation]. *Trudy Mezhdunarodnoi shestnadsatoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii «Elektroprivody peremennogo toka»* [Proceeding of the sixteenth international scientific-technical conference "Alternating current electrical drives"]. Ekaterinburg, 2015, pp. 55–58. (In Russian).
4. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Dymko S.S. [Investigation of dead time influence in frequency converters]. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov «Sovremennye problemy elektroenergetiki i avtomatiki»* [Proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students "Modern problems of electrical power engineering and automation"]. Kiev, 2009, pp. 35–38. (In Russian).
5. Burakov M.V., Konovalov A.S. Modifikatsiya prediktora Smita dlya lineinogo ob"ekta s peremennymi parametrami [Modification of Smith predictor for a linear plant with changeable parameters]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2017, no. 4, pp. 25–34. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2017.4.25.
6. Schmirgel H., Krah J.O., Berger R. Delay time compensation in the current control loop of servo drives – higher bandwidth at no trade-off. *PCIM Europe Proceedings*, Nürnberg, Germany, 2006, pp. 541–546.
7. Klarenbach C., Schmirgel H., Krah J.O. Design of fast and robust current controllers for servo drives based on space vector modulation. *PCIM Europe*, Nürnberg, Germany, 2011, pp. 182–188.
8. Zhang Q., Shen Q., Tong Q., Qin H. Predictive control for a permanent magnet synchronous motor using automatic tuning Smith-predictor with optimal parameter mismatch. *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 2008, pp. 1520–1525.
9. Kiesbauer J., Vnuce D., Fuchs J., Konigorski U. *Entkopplung der Regelgrößen in einem Fluidfördersystem mit Totzeit*. Patent EP, no. WO2011120689A1, 2011.
10. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskii G.G. *Upravlenie elektroprivodami* [Control over electric drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 382 p.
11. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. *Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and model control]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984. 216 p.
12. Lebedev A.V., Filaretov V.F. Samonastroyayushchayasya sistema s etalonnoi model'yu dlya upravleniya dvizheniem podvodnogo apparata [Self-adjusting system with a reference model for control of underwater vehicle motion]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 42–52. (In Russian).
13. Schroeder D. *Elektrische Antriebe, regelung von antriebssystemen*. Berlin, Springer, 2009. 1336 p. DOI: 10.1007/978-3-540-89613-5.
14. Hsu J.C., Meyer A.U. *Sovremennaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya i ee primeneniye* [Modern control principles and applications]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 544 p. (In Russian).
15. Lamsahel H., Zehringer T., Sworowski E. *Verfahren und Vorrichtung zur Totzeitkompensation*. Patent Germany, no. DE102012111696A1, 2014.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Кромм Андрей Артурович** – родился в 1960 году, канд. техн. наук, инженер высшей квалификации в компании Linde Material Handling, GmbH, Ашаффенбург, Германия. Область научных интересов: автоматизированный электропривод постоянного и переменного тока с переменной структурой. Опубликовано более 15 научных работ. (Адрес: 630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Депутатская, 60/39. E-mail: galand@gmx.net).

**Kromm Andrej Arturovich** (b. 1960) – Candidate of Sciences (Eng.), professor, highly qualified engineer at Linde Material Handling, GmbH, Aschaffenburg, Germany. His research interests are currently focused on automated electric drive with a variable structure. He is the author of more than 15 scientific publications. (Address: 60/39, Deputatskaya St., Novosibirsk, 630099, Russia. E-mail: galand@gmx.net).



**Симаков Геннадий Михайлович** – родился в 1942 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ЭАПУ, НГТУ. Область научных интересов: автоматизация систем автоматизированного электропривода. Опубликовано более 150 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Simakov44\_86@mail.ru).

**Simakov Gennadiy Mikhailovich** (b. 1942) – Doctor of Sciences (Eng.), professor, professor at Electric Drives and Automation department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on automation of control systems of electric drives. He is the author of more than 150 scientific publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Simakov44\_86@mail.ru).



**Гусев Андрей Евгеньевич** – родился в 1999 году. Закончил обучение в НГТУ. Область научных интересов: теория электропривода, системы управления электроприводом, электроника. Опубликовано две научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: andrey223gg@yandex.ru).

**Gusev Andrey Evgenevich** (b. 1999) – graduated from Novosibirsk State Technical University. His research interests include electric drive theory, electric drive control systems, and electronics. He is the author 2 scientific publications. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: andrey223gg@yandex.ru ).

Статья поступила 23 ноября 2022

Received November 23, 2022

---

To Reference:

Kromm A.A., Simakov G.M., Gusev A.E. Vysokodinamichnaya kompensatsiya «mertvogo vremeni» v elektricheskikh privodakh na baze signal'noi adaptatsii [Highly dynamic "Dead time" compensation in electric drives based on signal adaptation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2023, no. 2 (59), pp. 16–28. DOI: 10.17212/1727-2769-2023-2-16-28.