

# Новые функциональные возможности

## И «интеллектуальные» свойства электроприводов серии ЭПВ

**В статье представлены новые варианты исполнения преобразователей серии ЭПВ, предназначенных для управления электродвигателями переменного тока. Рассмотрены режимы управления за счет энергии торможения, мягкого переключения двигателя между преобразователем частоты и сетью, функция защиты преобразователя по динамической тепловой модели IGBT-модуля.**

**Анатолий Виноградов, к. т. н.**  
**Андрей Сибирцев**  
**Валерий Чистосердов, к. т. н.**  
**Илья Колодин**  
**Дмитрий Монов**

vector@drive.ispu.ru

Преобразователи и комплектные электроприводы серии ЭПВ представляют собой новое поколение многофункциональных, «интеллектуальных» устройств управления низковольтными электродвигателями переменного тока, асинхронными и синхронными, мощностью от 1 до 400 кВт. Они предназначены для построения регулируемого привода механизмов и технологических комплексов с самыми различными требованиями к параметрам регулирования и условиям эксплуатации: от насосов и вентиляторов до высокоточных станков и следящих систем. Преобразователи разработаны научно-техническим центром электропривода «Вектор» Ивановского государственного энергетического университета и выпускаются ООО «ЭЛПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода.

Четыре основных исполнения электроприводов серии ЭПВ включают:

- 1) асинхронный электропривод общепромышленного назначения с частотным управлением и векторной ориентацией переменных ( $D_{\omega} > 50$ ;  $F_u = 0...400$  Гц) [1, 6];
- 2) высококачественный асинхронный электропривод с адаптивно-векторным управлением ( $D_{\omega} > 100\,000$ ;  $F_{\omega} > 100$  Гц) [2, 7];
- 3) высококачественный синхронный электропривод с адаптивно-векторным управлением ( $D_{\omega} > 100\,000$ ;  $F_{\omega} > 100$  Гц) [3, 8];
- 4) бездатчиковый асинхронный электропривод с адаптивно-векторным управлением и улучшенными динамическими характеристиками ( $D_{\omega} > 50$ ;  $F_{\omega} > 30$  Гц) [4, 9], где  $D_{\omega}$  — диапазон регулирования скорости;  $F_{\omega}$  — полоса пропускания контура скорости;  $F_u$  — диапазон изменения частоты выходного напряжения.

В дополнение к указанным исполнениям в 2006 году освоено производство следующих преобразовательных устройств:

- преобразователи с адаптивно-векторным управлением синхронным двигателем без датчика скорости/положения ( $D_{\omega} > 20$ ;  $F_{\omega} > 30$  Гц) [5, 10];
- преобразователи для управления высокоскоростными асинхронными электродвигателями ( $D_{\omega} > 50$ ;  $F_u = 0...3000$  Гц);
- блок рекуперативный с векторным управлением [3, 11]. Реализует функцию двунаправленного обмена энергией между питающей сетью и нагрузкой с высокими энергетическими характеристиками и показателями электромагнитной совместимости. Характеризуется синусоидальным сетевым током и регулируемым коэффициентом мощности.

Все исполнения преобразователей реализованы на единой аппаратной платформе, как по силовой части, так и по управлению, и отличаются друг от друга программным обеспечением, а также программно-аппаратным набором интерфейсных функций и режимов работы.

Одной из современных тенденций развития преобразовательной техники для регулируемого электропривода является постоянное расширение ее функциональных возможностей, режимов работы и интеллектуальных свойств. Широко распространенными в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе можно считать такие режимы, как автоматическая настройка на параметры двигателя, режим энергосбережения, пуск на вращающийся двигатель с поиском частоты вращения, торможение постоянным током, автоматическое ограничение темпа торможения, управление по циклограмме в относительном и реальном времени. Ряд преобразователей оснащен интерфейсом с персональным компьютером, с различными типами датчиков угловых перемещений, поддерживают функции программирования пользователем, стандартные каналы связи и протоколы обмена с микропроцессорными устройствами. Введение

новых объектно-ориентированных опций позволяет расширить область применения привода, снижать себестоимость проектов автоматизации промышленных установок и технологических комплексов, в частности, за счет переноса функций внешнего контроллера на программно-аппаратные средства преобразователя.

В дополнение к вышеуказанным функциональным возможностям преобразователя частоты (ПЧ) серии ЭПВ оснащены функциями «самопитания» (управления за счет энергии торможения), «синхрокоммутации» (мягкого переключения двигателя между ПЧ и питающей сетью), функцией защиты по динамической тепловой модели IGBT-модуля, а также могут комплектоваться программно-аппаратным модулем управления многодвигательной установкой.

### Режим «самопитания»

Данный режим обеспечивает работоспособность электропривода при кратковременных провалах или пропадании напряжения питания. Реализация режима основана на использовании кинетической энергии, накопленной движущимися механическими массами нагрузки и возвращаемой в инвертор при частотном торможении. Одним из способов реализации данного режима является переход электропривода к структуре управления с внешним контуром регулирования входного напряжения инвертора и внутренним контуром регулирования активной составляющей тока. Наиболее органично эта концепция вписывается в системы векторного управления электроприводом [7, 8, 9], в которых контуры регулирования активной и реактивной составляющих тока входят в базовую структуру регулирования скорости. При переходе в режим «самопитание» регулятор входного напряжения инвертора включается вместо регулятора скорости. При восстановлении питания осуществляется обратный переход к регулированию скорости. Настройка пропорционально-интегрального регулятора напряжения выпол-

няется на симметричный оптимум. На рис. 1 приведены временные диаграммы скорости ( $\omega$ ), электромагнитного момента ( $M$ ), входного напряжения инвертора ( $U_d$ ) привода исполнения 2 при кратковременном пропадании напряжения питания и активной опции «самопитание». Эксперимент проводился при следующих условиях: преобразователь частоты ЭПВ-ТТПТ-10-380-2АП; двигатель асинхронный 4A112МА6У3; момент нагрузки  $M_c = 0,5M_{ном} = 15$  нм; момент инерции  $J = 0,17$  кг·м<sup>2</sup>; порог активизации режима «самопитания»  $U_{d0} = 460$  В; заданный уровень стабилизации входного напряжения инвертора  $U_{dz} = 450$  В.

Основными достоинствами рассмотренного способа реализации режима «самопитание» являются высокая динамическая и статическая точность регулирования напряжения, отсутствие низкочастотных колебаний в напряжении и токах, режим работы двигателя близок к холостому ходу и характеризуется малыми потерями энергии.

При реализации рассмотренной концепции режима «самопитания» в рамках систем частотного управления без датчика скорости, в базовых структурах которых отсутствует регулятор активного тока, возникает проблема «мягкого» переключения между структурами (главным образом, проблема «мягкого» возврата к базовой структуре управления из режима «самопитание»). Решением проблемы является построение вычислителя частоты для режима «самопитание» или использование опции «самоподхват» (мягкий пуск на вращающийся двигатель с функцией поиска частоты вращения) при возвращении к базовой структуре управления. При этом алгоритмы реализации режима «самопитание» в системе частотного управления оказываются более сложными, требующими большего объема изменений базового программного обеспечения, чем в векторных системах.

Другой способ реализации режима «самопитание» основан на построении релейного контура регулирования входного напряжения инвертора внешним по отношению к контуру регулирования скорости (частоты). Алго-

ритм работы привода в этом режиме реализуется следующим образом.

1. Активизация режима происходит при установленном бите опции «самопитание» и выполнении условия  $U_d < U_{d0}$ . Начинается торможение привода с заданной интенсивностью.
2. Торможение привода останавливается по условию  $(U_d > U_{d1})$  или  $(I_d < -I_{d0})$  и возобновляется по условию  $(U_d < U_{d0})$  и  $(I_d > 0)$ , где  $U_{d0}, U_{d1}, I_{d0}$  — программируемые пороговые значения входного напряжения и тока инвертора;  $I_d$  — входной ток инвертора, вычисляемый из фазных токов и напряжений. В ортогональной системе координат ( $x, y$ ), вращающейся с произвольной скоростью, входной ток инвертора вычисляется по выражению:  $I_d = (3/2)[(U_x I_x + U_y I_y) / U_d]$ .
3. При останове торможения производится коррекция заданного значения скорости (частоты) по его фактическому значению, чтобы перевести двигатель в режим, близкий к холостому ходу.
4. Если после остановки торможения оно не возобновляется в течение определенного интервала времени, то считается, что питание преобразователя восстановлено, и он переходит на один из следующих режимов работы, выбранный пользователем: отработка текущего задания по скорости или управляемый останов привода.

На рис. 2 приведены временные диаграммы напряжения на входе инвертора и частоты выходного напряжения ПЧ ( $f$ ) работы привода исполнения 1 в режиме «самопитания» при кратковременном пропадании питания.

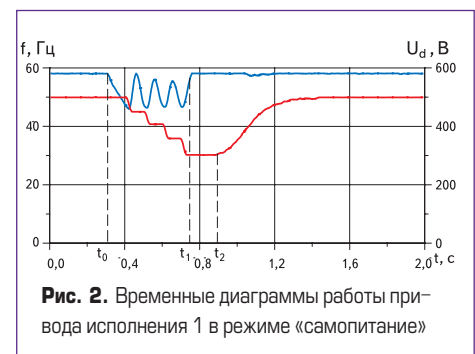


Рис. 2. Временные диаграммы работы привода исполнения 1 в режиме «самопитание»

На интервале  $t_0 \dots t_1$  отключено напряжение сети и действует алгоритм «самопитание». На интервале  $t_1 \dots t_2$  осуществляется подтверждение восстановления напряжения сети. Способ выхода из режима «самопитание» программируется пользователем: либо возвращение к текущему заданию скорости, либо аварийный останов привода. Особенностью реализации режима «самопитания» с релейным контуром регулирования  $U_d$  является то, что базовая часть структуры регулирования скорости не претерпевает изменений при включении режима. Это исключает проблемы, связанные с переключением структур в системах частотного управления. Однако в переменных привода присутствуют низкочастотные колебания, приводящие к дополнительным потерям энергии.

Использование режима «самопитания» совместно с опциями «плохая сеть» и автоматический перезапуск существенно повышает устойчивость работы электропривода в условиях низкого качества напряжения питающей сети.

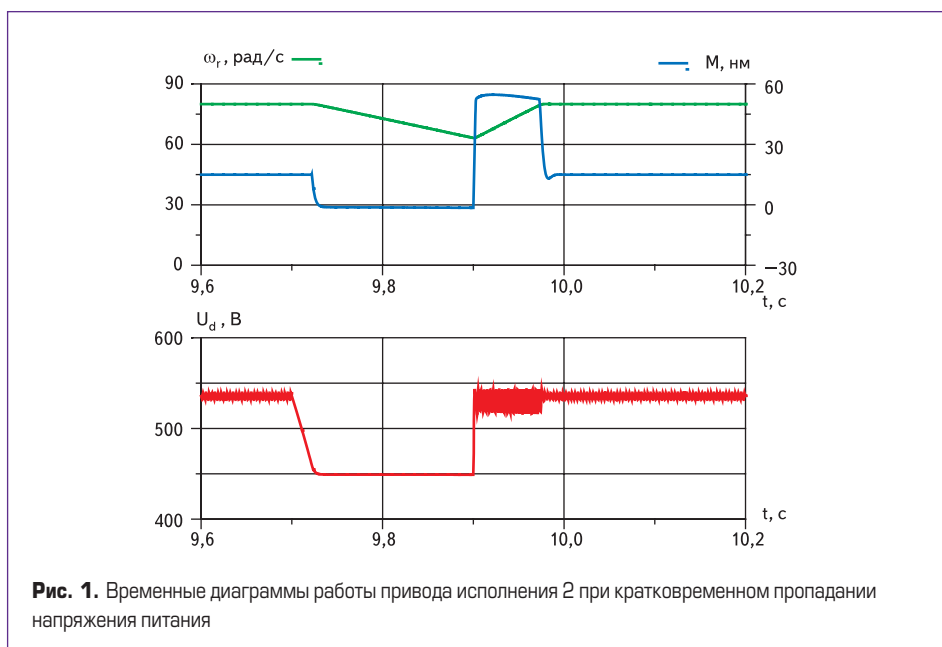


Рис. 1. Временные диаграммы работы привода исполнения 2 при кратковременном пропадании напряжения питания

**Режим «синхрокоммутации»**

Мягкое (без паузы на отключение питания) переключение двигателя между ПЧ серии ЭПВ и сетью выполняется за счет синхронизации выходного напряжения ПЧ с напряжением сети и формирования сигналов управления контакторами подключения двигателя к сети и к ПЧ (рис. 3). При этом обеспечивается возможность кратковременной работы ПЧ параллельно с сетью. Синхронизация производится путем мониторинга мгновенных значений напряжений фаз сети с помощью датчиков, установленных на встроенной в ПЧ плате расширения ЕС4. На основе информации с датчиков вычисляются частота вращения, амплитуда и фазовый угол вектора напряжения сети. Эти значения используются в качестве задания на формирование выходного напряжения инвертора. Система управления выполняет последовательное согласование напряжения по частоте, по амплитуде и по фазе. С целью исключения возможности возникновения аварийных режимов из-за несоответствия заданного преобразователем и реального состояния силовых контактов контакторов КМ1, КМ2 в ПЧ введены логические сигналы с их блок-контактов. Использование этих сигналов позволило реализовать алгоритм управления, инвариантный к времени срабатывания контакторов, и минимизировать время переключения.

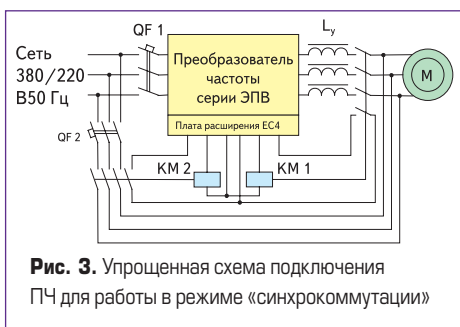


Рис. 3. Упрощенная схема подключения ПЧ для работы в режиме «синхрокоммутации»

На рис. 4 представлены временные диаграммы фазного тока и скорости двигателя при его переключении от ПЧ к сети при отсутствии (а) и наличии (б) временной паузы на затухание поля двигателя. КМ1, КМ2 — состояния одноименных контакторов, подключающих двигатель к ПЧ и к сети соответственно. Ограничение уравнивающего тока между выходом ПЧ и сетью на интервале пе-

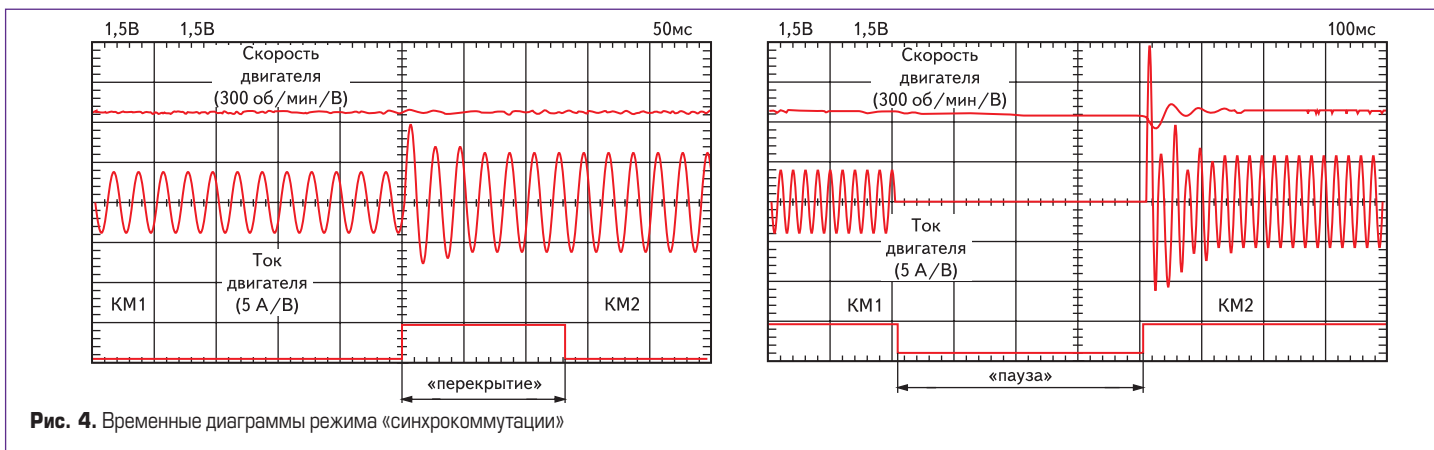


Рис. 4. Временные диаграммы режима «синхрокоммутации»

рекрытия активных состояний контакторов осуществляется 3-фазным уравнительным реактором  $L_y$ , с падением напряжения на номинальном токе 4...8% от номинального напряжения сети с частотой 50 Гц. Уравнительный реактор может быть исключен из схемы подключения ПЧ при выборе режима переключения с временной паузой на затухание поля. Диаграммы получены на экспериментальной установке, включающей преобразователь ЭПВ-ТТПТ-10-380-1АО, двигатель 4А112МА6У3, при отсутствии нагрузки на валу двигателя.

Использование этого режима в модуле управления многодвигательной установкой позволяет осуществлять регулирование технологического параметра путем изменения числа работающих двигателей и регулирования скорости одного из них от ПЧ с мягким переключением двигателя от ПЧ к сети.

**Режим «самоподхвата»**

Режим обеспечивает автоматическое определение скорости асинхронного двигателя (АД) и мягкое включение преобразователя в работу на вращающийся двигатель. Режим поиска частоты может быть востребован при работе электропривода на механизмы с высокими моментами инерции или с активным моментом нагрузки, когда при кратковременной блокировке преобразователя частоты сигналами управления или срабатывании защит не происходит быстрого останова двигателя вयोगем.

Для реализации этого режима работы используется специальный поисковый алгоритм — частотное сканирование АД на пониженном напряжении по критерию достижения минимума тока статора.

При активизации режима выполняется следующая последовательность действий.

1. Реализуется выдержка времени, достаточная для затухания поля в двигателе (при первоначальном пуске выдержка времени не выполняется).
2. Запускается процедура поиска фактической скорости двигателя путем сканирования частоты на пониженном напряжении с контролем тока статора и определением его минимума. Темп поиска задается пользователем. Поиск начинается от верхней (по модулю) границы диапазона поиска частоты в направлении ее уменьшения до момента

определения фактической частоты вращения (момент фиксации экстремума тока статора) или до минимальной частоты 1 Гц. Если частота не была определена и разрешен поиск в обоих направлениях, то сканирование продолжается в противоположном направлении, также начиная с верхней границы до момента нахождения фактической частоты вращения или до минимальной частоты.

3. Найденная частота фиксируется и осуществляется плавное нарастание напряжения с заданной интенсивностью до уровня, соответствующего найденной частоте, с соблюдением соотношения  $U_{ном} / F_{ном} = const$ .
4. Далее привод переходит к отработке текущего задания и разгоняется до заданной скорости с ускорением, соответствующим установленным параметрам датчика интенсивности. На рис. 5 приведены осциллограммы частоты напряжения статора  $F_s$ , действующего значения выходного напряжения преобразователя частоты  $U_s$ , действующего значения тока статора  $I_s$  и мгновенного значения фазного тока  $I_v$  в режиме поиска частоты. Скорость двигателя соответствует фактической частоте — 25 Гц. На диаграммах хорошо видны все этапы выполнения поискового алгоритма с двунаправленным сканированием, переход к отработке текущего задания не показан.

При настройке алгоритма «самоподхвата» могут задаваться следующие его параметры: верхняя граница диапазона поиска, интенсивность частотного сканирования, направления поиска, интенсивность нарастания напряжения после завершения поиска частоты, чувствительность алгоритма обнаружения экстремума.

**Функция защиты ПЧ по динамической тепловой модели IGBT-модуля**

Функция защиты ПЧ по динамической тепловой модели IGBT-модуля [12] позволяет повысить надежность и перегрузочную способность электропривода.

Традиционный способ тепловой защиты преобразователя основан на контроле температуры датчика, измеряющего температуру радиатора, или встроенного датчика, измеряющего температуру подложки силового модуля. Вследствие того, что тепловые постоянные времени кристаллов на несколько порядков меньше постоянных времени датчиков температуры радиатора и подложки модуля, кон-

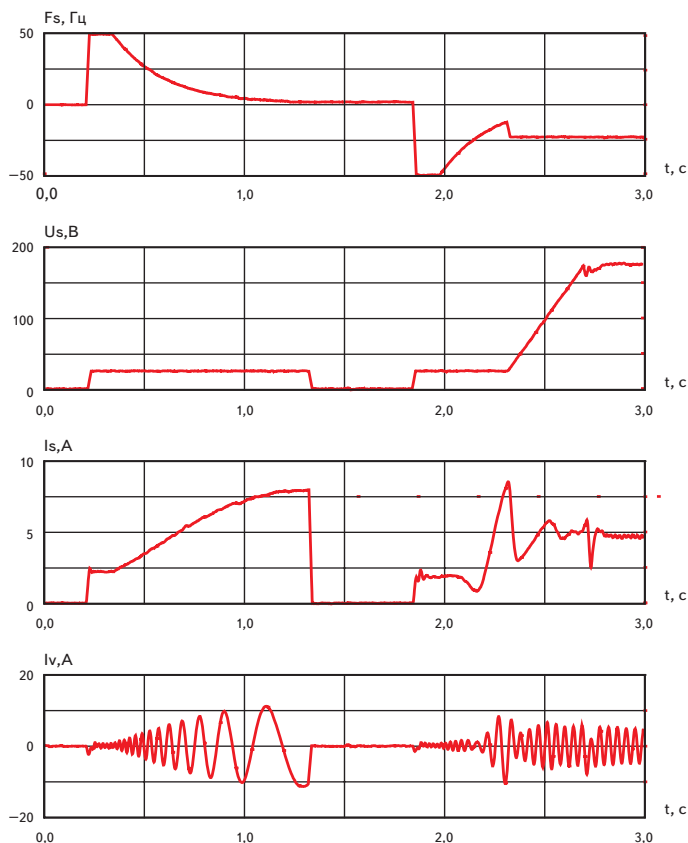


Рис. 5. Осциллограммы режима «самоподхвата»

троль этих температур сам по себе неспособен надежно защитить модуль от больших кратковременных токовых перегрузок. Важнейшим фактором построения тепловой защиты в этом случае становится ограничение предельного значения тока перегрузки. Если этот ток рассчитать исходя из тепловых процессов модуля, то он оказывается сложной функцией многих переменных, среди которых: время перегрузки, частота основной гармоники, частота ШИМ, входное напряжение инвертора, коэффициент модуляции, cosφ нагрузки, температура корпуса элементов модуля. Так как задать данную функцию в реальном времени работы преобразователя весьма проблематично, то обычно поступают следующим образом: предельно допустимое значение выходного тока  $I_{max}$  принимают постоянным исходя из выбранного типового режима работы преобразователя. Выбор типового режима для расчета  $I_{max}$  является прерогативой разработчика. При таком подходе к построению тепловой защиты значение  $I_{max}$ , как правило, оказывается в 3–5 раз ниже кратковременного пикового тока модуля, так как выбирается из наилучшего в тепловом отношении режима работы.

Значительно повысить величину  $I_{max}$ , обеспечив при этом более высокую надежность преобразователя, позволяет построение тепловой защиты модуля на основе расчета мгновенного значения температуры его кристаллов в реальном времени. Тепловой расчет выполняется в динамической модели на основе информации о мгновенных значениях переменных: токов, протекающих через элементы модуля (транзисторы и обратные диоды); входного напряжения инвертора; мгновенного состояния всех элементов модуля. Такой подход обеспе-

чивает инвариантность алгоритма теплового расчета к интегральным, усредненным на периоде основной гармоники, значениям переменных, а также к способу формирования и виду ШИМ. Усреднение переменных допускается только на малых интервалах, меньших значения самой малой тепловой постоянной времени кристаллов. На рис. 6 приведены временные диаграммы скорости двигателя, действующего значения выходного тока преобразователя, температур кристаллов всех шести транзисторов V1–V6 IGBT-модуля в режиме разгона двигателя с  $\omega = 20$  рад/с до  $\omega = 100$  рад/с при температуре корпуса  $T_{case} = 64$  °С.

Момент срабатывания тепловой защиты ( $t_{cp}$ ) определяется первым пересечением кривой температуры наиболее нагретого элемента модуля ( $\Theta_{v,1}$  на рис. 6) с заданным порогом сра-

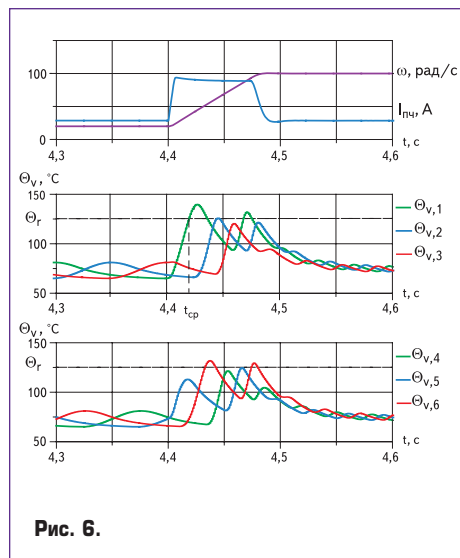


Рис. 6.

батывания защиты  $\Theta_v$ . Достоверность результатов подтверждена сравнением с результатами расчетов, выполненных на модели IPOSIM6, рекомендуемой фирмой EUPEC для расчета температурных режимов модулей своего производства, а также экспериментально.

Литература

1. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н., Монов Д. А. Асинхронный электропривод общепромышленного назначения с прямым цифровым управлением и развитыми интеллектуальными свойствами // Изв. вузов. Электромеханика. 2001. № 3.
2. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. 2003. № 7.
3. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н. и др. Новые серии многофункциональных векторных электроприводов переменного тока с универсальным микроконтроллерным ядром // Привод и управление. 2002. № 3.
4. Виноградов А. Б., Сибирцев А. Н., Колодин И. Ю. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ // Силовая электроника. 2006. № 3.
5. Виноградов А. Б., Сибирцев А. Н., Журавлев С. В. Бездатчиковый электропривод подъемно-транспортных механизмов // Силовая электроника. 2007. № 1.
6. Электроприводы с преобразователями частоты серии ЭПВ (Исполнение 1). Техническое описание и инструкция по эксплуатации [http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual\\_Inverter\\_EPV\\_Version1.pdf](http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual_Inverter_EPV_Version1.pdf), 2007.
7. Электроприводы с преобразователями частоты серии ЭПВ (Исполнение 2). Техническое описание и инструкция по эксплуатации [http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual\\_Inverter\\_EPV\\_Version2.pdf](http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual_Inverter_EPV_Version2.pdf), 2007.
8. Электроприводы с преобразователями частоты серии ЭПВ (Исполнение 3). Техническое описание и инструкция по эксплуатации [http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual\\_Inverter\\_EPV\\_Version3.pdf](http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual_Inverter_EPV_Version3.pdf), 2007.
9. Электроприводы с преобразователями частоты серии ЭПВ (Исполнение 4). Техническое описание и инструкция по эксплуатации [http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual\\_Inverter\\_EPV\\_Version4.pdf](http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual_Inverter_EPV_Version4.pdf), 2007.
10. Электроприводы с преобразователями частоты серии ЭПВ (Исполнение 5). Техническое описание и инструкция по эксплуатации [http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual\\_Inverter\\_EPV\\_Version5.pdf](http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual_Inverter_EPV_Version5.pdf), 2007.
11. Рекуперативные блоки серии ЭПВ-Р. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual\\_Recuperator\\_EPV\\_R.pdf](http://vectorgroup.ru/files/doc/Manual_Recuperator_EPV_R.pdf), 2007.
12. Виноградов А. Б., Сибирцев А. Н., Колодин И. Ю. Реализация защиты преобразователя частоты на основе динамической тепловой модели IGBT-модуля // Силовая электроника. 2006. № 2.