

УДК 62-83:681.532.55

DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-23-29

А. В. БУБНОВ
А. Н. ЧЕТВЕРИК
А. Н. ЧУДИНОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОБЩЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

В статье приведена разработанная обобщенная компьютерная модель электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости. Модель создана на основе модели импульсного частотно-фазового дискриминатора с дополнительными функциональными возможностями, что позволяет исследовать наиболее эффективные, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования, способы управления данным электроприводом. Это значительно уменьшает время моделирования, что ускоряет исследование синхронно-синфазного электропривода и электропривода с фазовой синхронизацией в областях высоких частот вращения.

Ключевые слова: ошибка по частоте вращения, фазовая автоподстройка частоты вращения, электропривод, фазирование, синхронизация, импульсный частотно-фазовый дискриминатор.

Синхронно-синфазные электроприводы (ССЭ) и электроприводы с фазовой синхронизацией (ЭПФС) широко используются в робототехнических комплексах, обзорно-поисковых и сканирующих системах и устройствах, регистрирующих и лентопротяжных устройствах, копировальных установках, полиграфических машинах. В основе ССЭ и ЭПФС лежит принцип фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Применение указанных электроприводов в основном определяется высокой точностью в широком диапазоне регулирования угловой скорости (точность регулирования по углу — единицы угловых секунд, точность по угловой скорости — порядка 0,001 %) [1].

Для реализации принцип фазовой автоподстройки частоты в качестве задающего сигнала

используется импульсный частотный сигнал $f_{on'}$, который генерируется с помощью кварцевого генератора, в качестве сигнала обратной связи применяют частотный сигнал $f_{oc'}$, который генерируется на выходе импульсного датчика частоты (ИДЧ) вращения; а для организации процесса сравнения этих сигналов используют логическое устройство сравнения (ЛУС). ЛУС, как правило, реализуется в виде импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД).

Применение указанного принципа фазовой автоподстройки частоты [2–8] позволяет обеспечить высокую точность стабилизации угловой скорости при относительно более простой схеме управления и не такой высокой стоимости компонентов системы управления, как при применении полностью цифровых систем управления

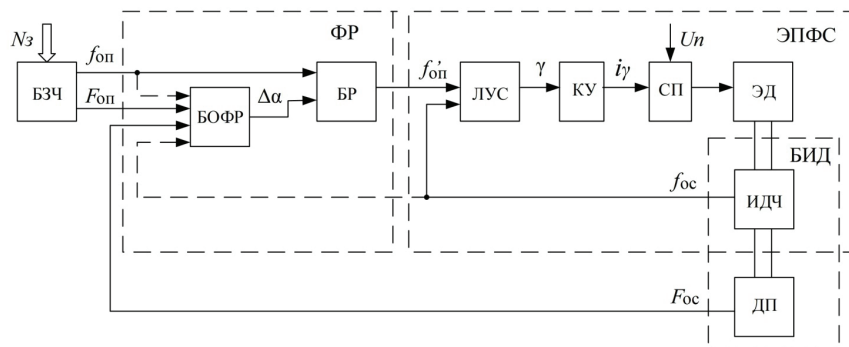


Рис. 1. Функциональная схема синхронно-синфазного электропривода

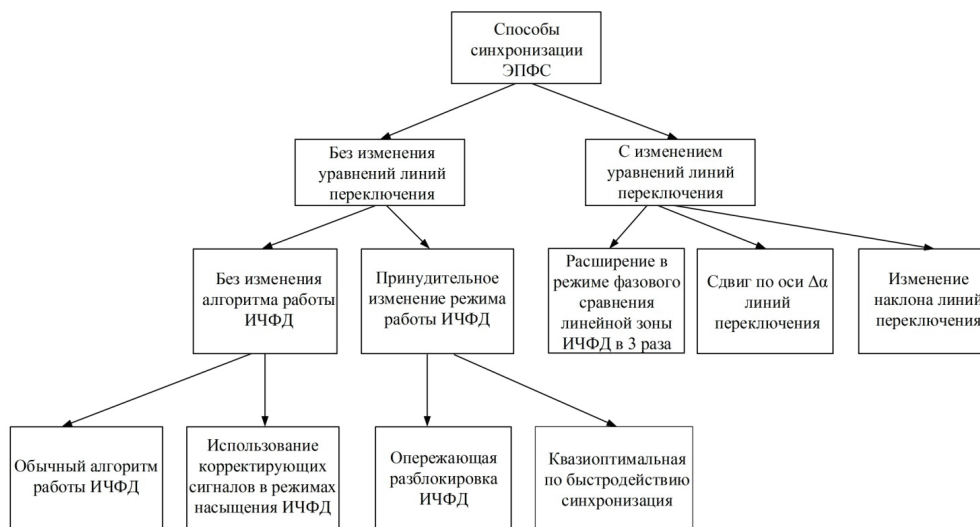


Рис. 2. Классификация способов синхронизации электропривода

электроприводом [9]. Функциональная схема синхронно-синфазного электропривода, использующего принцип ФАПЧ, приведена на рис. 1, где БЗЧ — блок задатчика частоты, КУ — корректирующее устройство, БОФР — блок определения фазового рассогласования, СП — силовой преобразователь, ЭД — электродвигатель, ИДЧ — импульсный датчик частоты вращения, ФР — фазированный регулятор, ДП — датчик положения, ЛУС — логическое устройство сравнения, БР — блок регулирования.

Логическое устройство сравнения является ключевым элементом ЭПФС и ССЭ, так как обеспечивает сравнение фаз импульсного сигнала задания и импульсного сигнала обратной связи, а это является отличительной особенностью рассматриваемых электроприводов. Рассмотрим режимы насыщения ЛУС. Выходной сигнал ЛУС в этом случае $\gamma = \pm 0,5$. В этом режиме происходит максимальный разгон с ускорением $\varepsilon_m (\gamma = +0,5)$ или максимальное торможение с ускорением $-\varepsilon_m (\gamma = -0,5)$ электропривода. В пропорциональном режиме работы величина сигнала на выходе ЛУС находится в диапазоне $-0,5 < \gamma < +0,5$. Электромагнитный момент электродвигателя в этом случае прямо пропорционален величине сигнала на выходе логического устройства сравнения коэффициентам пропорционально-дифференциального регулятора с учетом токоограничения обмоток электродвигателя.

В процессе синхронизации на заданной угловой скорости в ЭПФС и ССЭ происходит перерегулирование по угловой скорости $\Delta\omega$, что негативно влияет на динамику электропривода. Для уменьшения перерегулирования по $\Delta\omega$ и повышения быстродействия ЭПФС и ССЭ используются различные способы управления электроприводом. К способам улучшения динамики электропривода относятся способы синхронизации (внутренний контур регулирования) и способы фазирования (внешний контур регулирования).

Алгоритм последовательной стыковки во времени процессов синхронизации и фазирования (фазирование выполняется после завершения синхронизации) лежит в основе большинства способов регулирования ССЭ. Это объясняется простотой реализации, которая не требует множества измерительных элементов. В последнее время, благодаря разработке измерительных устройств координат электропривода, реализующих косвенные численные методы определения ошибки по углу, ошибки по угловой скорости и ускорения, к этим способам добавились и другие, основанные на фазировании, которое происходит до фазовой синхронизации на заданной частоте вращения (предварительном фазировании), что позволяет улучшить динамические показатели качества и диапазон регулирования рассматриваемых электроприводов.

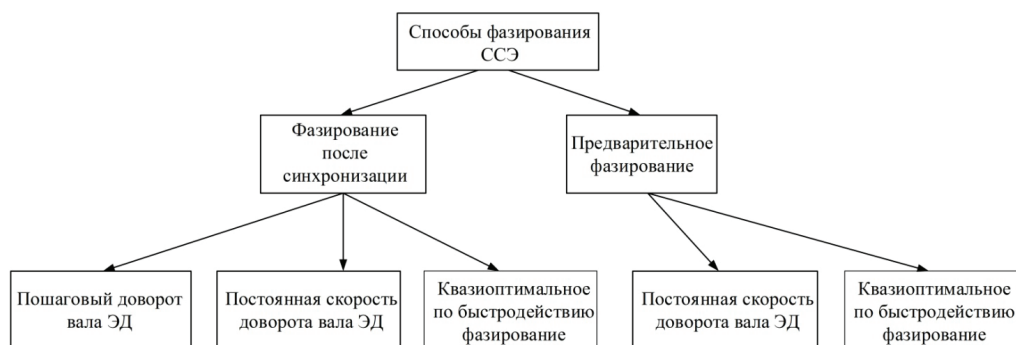


Рис. 3. Классификация способов фазирования ССЭ



Рис. 4. Классификация вариантов применения импульсного частотно-фазового дискриминатора с расширенными функциональными возможностями

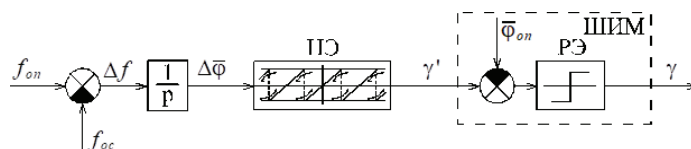


Рис. 5. Полная модель импульсного частотно-фазового дискриминатора

На рис. 2 приведена классификация способов синхронизации электропривода. Классификация способов фазирования синхронно-синфазного электропривода изображена на рис. 3.

Для реализации наиболее эффективных, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования ССЭ, способов управления электроприводом в качестве ЛУС необходимо использовать импульсный частотно-фазовый дискриминатор с дополнительными функциональными возможностями: индикацией режима работы ИЧФД, моментов времени прохождения двух импульсов одной частоты между двумя импульсами другой частоты (моментов изменения углового рассогласования на $\varphi_0 = \pm 2\pi/z$ — угловое расстояние между метками импульсного датчика частоты, где z — число меток ИДЧ) и возможностью принудительной установки ИЧФД в требуемый режим работы.

Классификация вариантов применения дополнительных возможностей импульсного частотно-

фазового дискриминатора в системах управления ЭПФС и ССЭ приведена на рис. 4.

Эффективным методом исследования электроприводов является метод имитационного компьютерного моделирования [10]. Данный метод позволяет получать достаточно точные результаты, при значительной экономии времени и средств. Особенности компьютерного моделирования ССЭ определяются наличием в модели электропривода с фазовой синхронизацией многозначной статической нелинейности, которая входит в состав математической модели импульсного частотно-фазового дискриминатора. Одним из наиболее подходящих для создания компьютерных моделей пакетов программ является Matlab и его приложение Simulink, которые обладают достаточным инструментарием, удобством работы, наличием подробного описания, широким распространением и поддержкой как со стороны разработчиков, так и со стороны других пользователей.

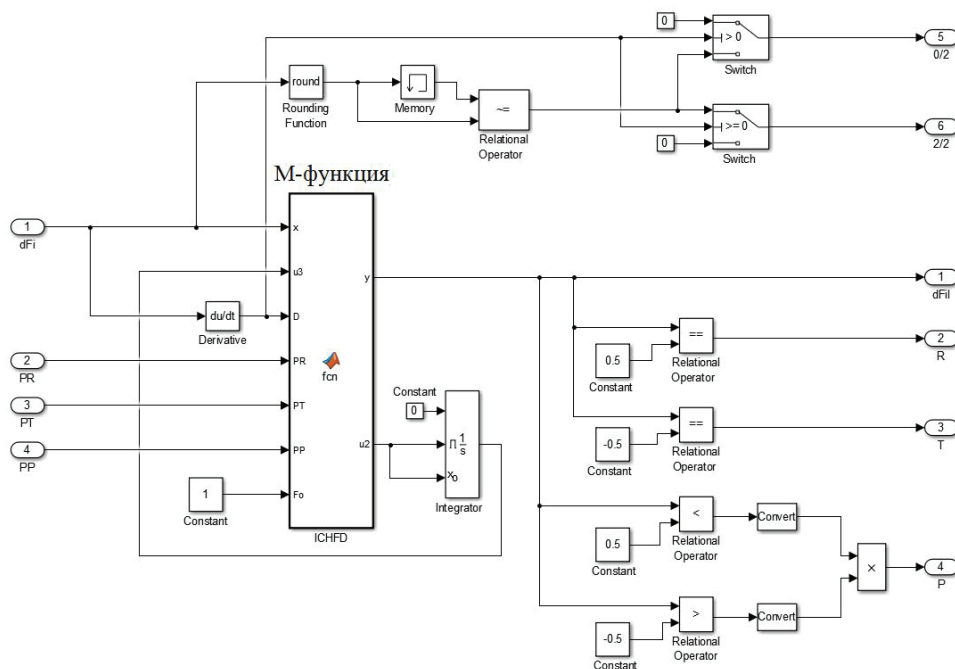


Рис. 6. Модель ИЧФД с дополнительными функциональными возможностями

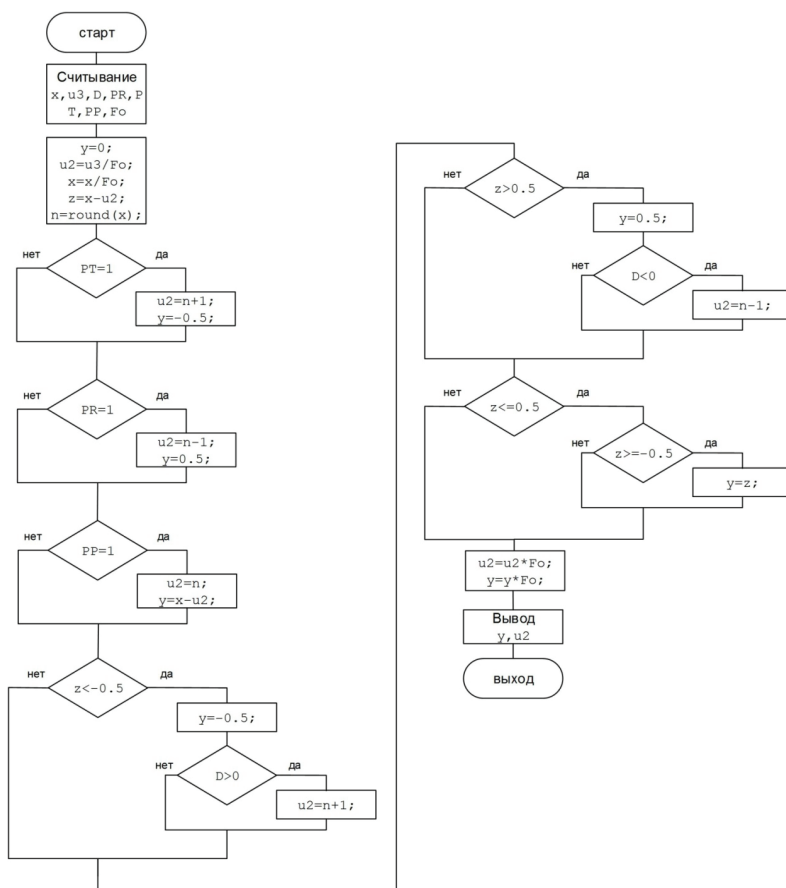


Рис. 7. Алгоритм программы М-функции ИЧФД

При формировании компьютерной модели электропривода с фазовой синхронизацией и внутреннего контура регулирования в синхронно-синфазном электроприводе могут быть использованы две модели импульсного частотно-фазового дискриминатора:

— с представлением ИЧФД в виде многозначной статической нелинейности с линеаризацией

широко-импульсного модулятора в области высоких частот вращения;

— с представлением ИЧФД в виде логической структуры, учитывающей импульсный характер сравниваемых частотных сигналов.

У каждого из подходов к разработке компьютерной имитационной модели есть свои отличительные особенности, которые определяют

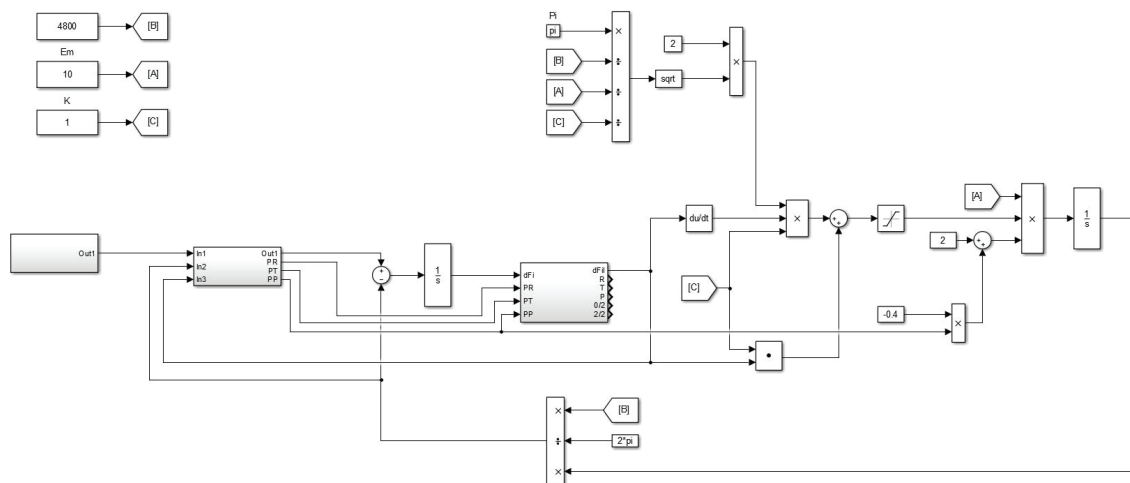


Рис. 8. Обобщенная модель синхронно-синфазного электропривода

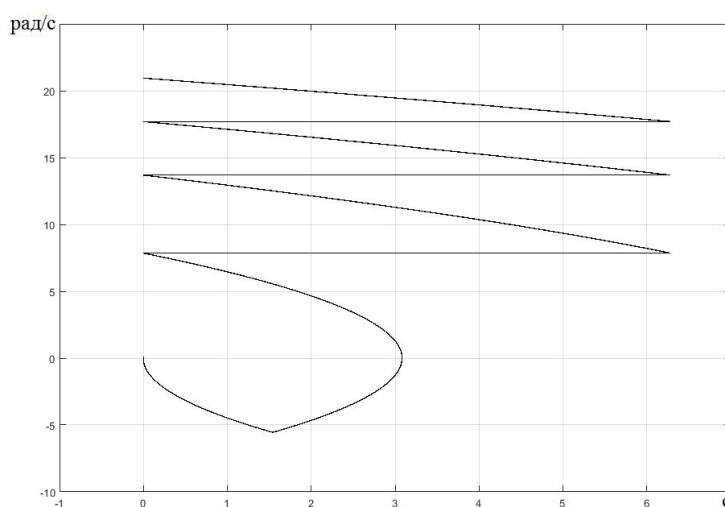


Рис. 9. Фазовый портрет фазирования

наиболее оптимальную, с точки зрения машинного времени, область их использования. Второй подход позволяет обеспечить большую точность моделирования в области низких частот вращения, первый — большее быстродействие при схожей точности, но только в области высоких угловых скоростей электропривода. При создании компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора за основу берется полная модель [11] ИЧФД (рис. 5).

При этом отсутствует модель нелинейного элемента, которая бы позволяла моделировать известные способы управления ЭПФС, т.к. в существующих моделях нет индикации состояния нелинейного элемента (моментов изменения углового рассогласования на φ_0) и удобного способа его принудительной установки в требуемый режим.

Целью работы является разработка обобщенной компьютерной модели электропривода, построенного на основе принципа ФАПЧ, с использованием модели ИЧФД (многозначной статической нелинейности с линеаризованным широтно-импульсным модулятором), позволяющей моделировать известные способы управления данным электроприводом при минимизации за-

трачиваемого на процесс компьютерного имитационного моделирования машинного времени.

На рис. 6 представлена разработанная в Simulink программная модель нелинейного элемента (ИЧФД) с дополнительными функциональными возможностями: индикацией режима работы нелинейного элемента, моментов изменения углового рассогласования на φ_0 и с возможностью принудительной установки ИЧФД в требуемый режим. Дополнительные функциональные возможности необходимы для исследований наиболее эффективных, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования ЭПФС и ССЭ, методом компьютерного имитационного моделирования.

Индикация режимов работы обеспечивается наличием выходных сигналов Р, П, Т. Если на выходе ИЧФД сигнал γ равен 0,5, то на выходе Р появляется значение «1», а на выходах П и Т — значения «0». Если на выходе ИЧФД сигнал γ равен $-0,5$, то на выходе Т появляется значение «1», а на выходах П и Р значения «0». Если на выходе ИЧФД значение сигнала γ находится в диапазоне от $-0,5$ до $0,5$, то на выходе П появляется значение «1», а на выходах Р и Т — значения «0». Импульсы на выходах 2/2 и 0/2 форми-

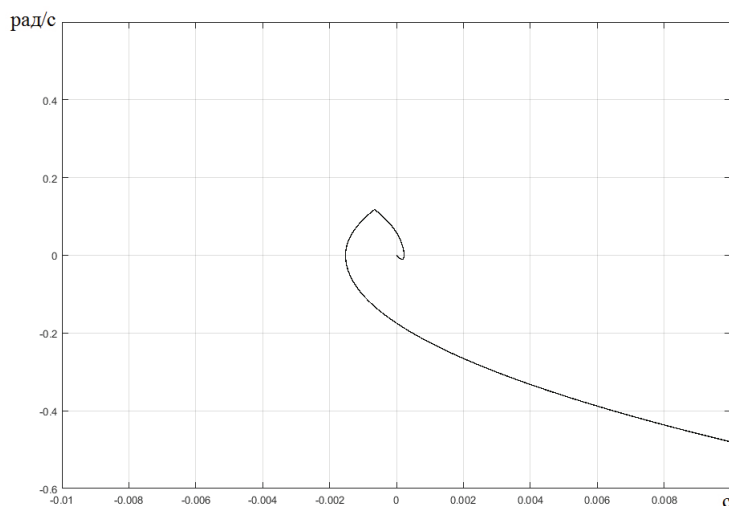


Рис. 10. Фазовый портрет синхронизации

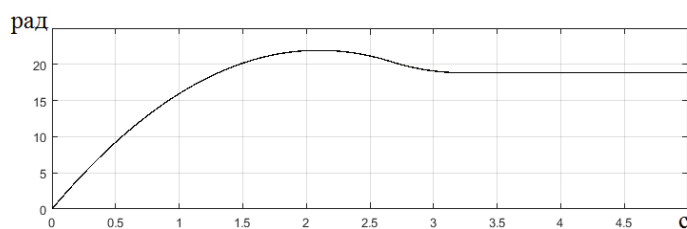
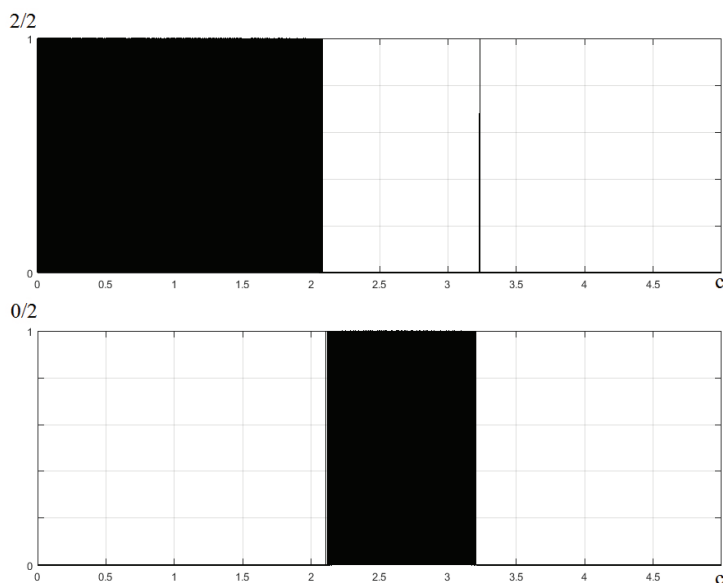


Рис. 11. Временная диаграмма углового рассогласования

Рис. 12. Временная диаграмма индикации моментов изменения углового рассогласования на φ_0

руются при изменении углового рассогласования на величину, равную φ_0 .

На рис. 7 представлен алгоритм работы программной части (М-функция) созданной компьютерной модели ИЧФД. Данный алгоритм позволяет принудительно устанавливать импульсный частотно-фазовый дискриминатор в требуемый режим работы (режимы насыщения и пропорциональный режим работы).

Установка в требуемый режим происходит следующим образом. При наличии единичного

сигнала на входе РТ — происходит переключение ИЧФД в режим положительного насыщения, вне зависимости от состояния входов x , $u3$, D , F_0 . При наличии единичного сигнала на входе РР — происходит переключение ИЧФД в режим отрицательного насыщения вне зависимости от состояния входов x , $u3$, D , F_0 . При наличии единичного сигнала на входе РР — происходит переключение ИЧФД в пропорциональный режим вне зависимости от состояния входов x , $u3$, D , F_0 .

Для проверки разработанной модели ИЧФД, было проведено имитационное моделирование оптимального по быстродействию способа регулирования ССЭ с помощью модели, представленной на рис. 8, построенной на базе линеаризованной математической модели [11]. В данном способе регулирования используется принудительная установка импульсного частотно-фазового дискриминатора в режимы разгона с максимальным ускорением, торможения с максимальным ускорением и в пропорциональный режим работы.

В результате моделирования получены фазовые портреты рис. 9 и рис. 10 (увеличенный масштаб рис. 9 в области синхронизации), временные диаграммы углового рассогласования (рис. 11) и индикации моментов изменения углового рассогласования на φ_0 (рис. 12), что соответствует прохождению двух импульсов одной частоты между двумя импульсами другой частоты. Полученные результаты полностью соответствуют теории прецизионного синхронно-синфазного электропривода и результатам компьютерного имитационного моделирования оптимального по быстродействию способа регулирования ССЭ с применением модели, учитывающей импульсный характер системы управления (нелинеаризованная модель).

На рис. 12 область, закрашенная черным, — это множество (несколько тысяч) импульсов, появляющихся на выходах 2/2 и 0/2 блока ИЧФД при изменении рассогласования по углу на φ_0 . Эти импульсы могут использоваться для определения углового положения и угловой скорости электродвигателя.

Разработанная компьютерная модель электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости, созданная на основе модели ИЧФД с дополнительными функциональными возможностями, позволяет исследовать наиболее эффективные, с точки зрения улучшения динамических показателей качества регулирования ССЭ и ЭПФС, способы управления электроприводом. При этом затрачивается на порядок (более чем в десять раз) меньше машинного времени, что значительно ускоряет исследование синхронно-синфазного электропривода и электропривода с фазовой синхронизацией в областях высоких частот вращения.

Библиографический список

1. Бубнов А. В. Вопросы теории и проектирования прецизионных синхронно-синфазных электроприводов постоянного тока: моногр. Омск, 2005. 190 с. ISBN 5-8149-0206-X.
2. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-locked loop in constant speed control system for the flywheel motor // *Recent Advances in Computer Science and Information Engineering*. 2012. Vol. 129. P. 323–330.
3. Best R. E. *Phase-Locked Loop Design, Simulation & Applications*. NY: McGraw-Hill, 2003. P. 109–114.
4. Hsieh G.-C., Hung J. C. Phase-locked loop techniques. A survey // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. Vol. 6, Issue 6. P. 609–615. DOI: 10.1109/41.544547.
5. Sen P. C., MacDonald M. L. Stability analysis of induction motor drives using phase-locked loop control

system // *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*. 1980. Vol. IECI-27, Issue 3. P. 147–155. DOI: 10.1109/TIECI.1980.351668.

6. Prasad E. S. N., Dubey G. K., Prabhu S. S. High-Performance DC Motor Drive with Phase-Locked Loop Regulation // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1985. Vol. IA-21, Issue 1. P. 192–201. DOI: 10.1109/TIA.1985.349680.

7. Hong S., Xiaohui Z., Ming L. The Research on Adaptive Fuzzy Control Systems of Brushless DC Motors Based on DSP // *International Journal of Control and Automation*. 2014. No. 9 (3). P. 357–364. DOI: 10.14257/ijca.2016.9.3.33.

8. Lanza P. T., Shtessel Y. B., Stensby J. L. Improved acquisition in a phase-locked loop using sliding mode control techniques // *Journal of the Franklin Institute*. 2015. Vol. 352, Issue 10. P. 4188–4204. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2015.06.001.

9. Балковой А. П., Цаценкин В. К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Изд-во МЭИ, 2010. 328 с. ISBN 978-5-383-00457-9.

10. Ramirez-Figueroa F. D., Pacas M. Model based control of a PMSM with variable switching frequency and torque ripple control // *IECON 2015 – 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Nov. 9–12, 2015. Yokohama, 2015. P. 1418–1423. DOI: 10.1109/IECON.2015.7392299.

11. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Федоров В. Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 104 с. ISBN 978-5-8149-0988-6.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника».

SPIN-код: 5358-0661

AuthorID (РИНЦ): 250020

ORCID: 0000-0002-0604-3795

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: A-6669-2015

Адрес для переписки: bubnov-av@bk.ru

ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 2930-8935

AuthorID (РИНЦ): 688459

ORCID: 0000-0001-8470-9823

ResearcherID: O-4913-2017

Адрес для переписки: alina.an@mail.ru

ЧУДИНОВ Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая техника».

SPIN-код: 9836-7611

AuthorID (РИНЦ): 687445

Адрес для переписки: chudinov_al@mail.ru

Для цитирования

Бубнов А. В., Четверик А. Н., Чудинов А. Н. Разработка и исследование обобщенной компьютерной модели электропривода с импульсно-фазовым регулированием угловой скорости // *Омский научный вестник*. 2019. № 2 (164). С. 23–29. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-164-23-29.

Статья поступила в редакцию 13.03.2019 г.

© А. В. Бубнов, А. Н. Четверик, А. Н. Чудинов