

УДК 622.625.28-83

О. Н. Юрченко, д-р техн. наук,
Д. А. Михайличенко

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУСКА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Аннотация. Проводится анализ переходных процессов в момент пуска синхронного двигателя при использовании широтно-импульсного преобразователя с синусоидальным, трапецеидальным и прямоугольным выходным напряжением на базе математической модели, построенной в координатах ток статора-потокосцепление статора. Приведены графики потребления электроэнергии системой широтно-импульсный преобразователь частоты – синхронный двигатель при различных законах управления за один цикл работы.

Ключевые слова: синхронный электрический двигатель, математическая модель, широтно-импульсный преобразователь

O. Yurchenko, ScD.,
D. Mikhaylichenko

MODEL ANALYSIS OF THE SYNCHRONOUS MOTOR'S START-UP WITH THE PULSE-WIDTH FREQUENCY CONVERTER

Abstract. This work focuses on the analysis of the transients at the start-up time of the synchronous motor within using the pulse-width converter at sinusoidal, trapezoidal and rectangular output tension on the basis of the mathematical model which is put up in the current stator-the stator flux linkage coordinates. The graphs of the electricity consumption by the pulse-width converter of frequency – the synchronous motor systems are provided at the various laws of management per one working cycle.

Keywords: synchronous electric motor, mathematical model, pulse-width converter

O. M. Юрченко, д-р техн. наук,
Д. А. Михайличенко

МОДЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПУСКУ СИНХРОННОГО ДВИГУНА С ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ

Анотація. Проводиться аналіз перехідних процесів в момент запуску синхронного двигуна при використанні широтно-імпульсного перетворювача із синусоїдальною, трапецеїдальною та прямокутною вихідною напругою на базі математичної моделі, побудованої в координатах струм статора-потокосцеплення статора. Наведені графіки споживання електроенергії системою широтно-імпульсний перетворювач частоти- синхронний двигун при різних законах керування за один цикл роботи.

Ключові слова: синхронний електричний двигун, математична модель, широтно-імпульсний перетворювач

Введение. Пуск мощных синхронных электрических двигателей имеющих большие моменты инерции и предназначенных для функционирования в комплексе современных электромеханических систем, как правило, производится при помощи пусковых устройств, в т.ч. на основе полупроводниковых преобразователей электрической энергии [1, 2]. При этом алгоритмы формирования требуемых выходных электрических параметров таких пусковых устройств могут быть различными и варьироваться в силу требований технологии функционирования конкретного механизма [3, 4].

Актуальность. Оценка и выбор наиболее подходящего способа формирования выходных форм кривых тока и напряжения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) при широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для конкретной электротехнической системы, задача неоднозначная, ввиду существования нескольких вариантов управления преобразователем.

Поэтому актуальным является решение вопросов, связанных с моделированием пуска синхронного электрического двигателя (СЭД) с ШИП частоты при различных законах формирования выходных параметров преобразователя [5, 6].

Целью работы является анализ переходных процессов при пуске СЭД с использованием ШИП с синусоидальным, трапецеидальным и прямоугольным выходным напряжением на базе математической модели, построенной в координатах ток статора и потокосцепление статора [6].

Материалы исследований. Наиболее часто переходные процессы в электромеханических системах с СД рассматриваются в координатных осях d, q .

Однако особенностью применения преобразований в координатных осях d, q является положение о чисто синусоидальном фазном напряжении на статорных обмотках СД. И использование формирователей реального напряжения на его обмотках при использовании ШИП в режиме реального времени может привести к неоправданным погрешностям при моделировании. Для исследования использована математическая модель СЭД, в основу построения которой поло-

жена обобщенная система дифференциальных уравнений СЭД Парка-Горева в векторной форме записи [7, 8]. Для реализации ШИМ управления ШИП использован алгоритм формирования пространственного вектора напряжения [9 – 11]. При моделировании приняты параметры серийного СЭД ДС260/44-36УХЛ4. Решение поставленной задачи проводилось в программной среде Фортран.

Результаты моделирования пуска СЭД при синусоидальном, трапецидальном и прямоугольном напряжении питания приведены на рисунках 1; 2 и 3 соответственно.

Среднее значение пускового момента (рис.1,а) составляет 0,9 – 1,2 номинального. При этом время разгона составляет 3,2 с. Токи синхронного двигателя, пульсирующие с модуляцией низкой частоты (рис.1б) с амплитудой 0,4 – 0,5 номинального тока, обуславливают пульсации момента величиной 0,3 – 0,4 номинального.

Среднее значение пускового момента составляет 1,8 номинального, а время пуска приблизительно 2 с (рис. 2, а).

Характер переходных процессов при трапецидальном фазном напряжении отличается от процессов при синусоидальном фазном напряжении.

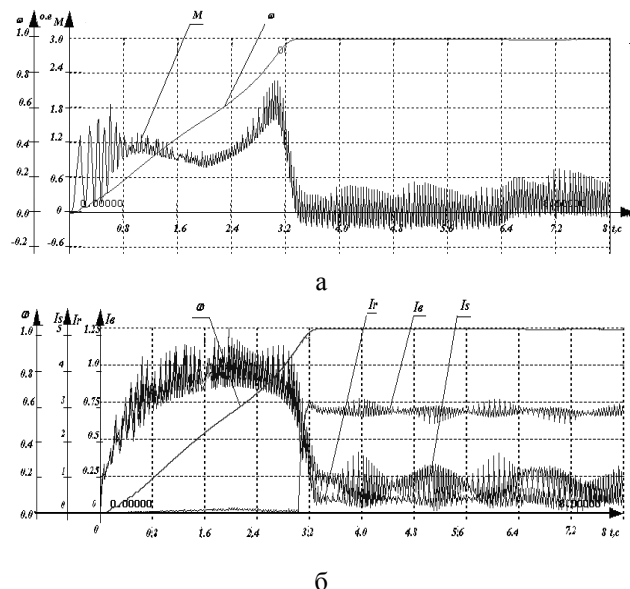


Рис. 1. Переходный процесс по скорости – ω и моменту – M при синусоидальном напряжении (а); переходный процесс по скорости – ω , току статора – I_s , пусковой обмотки – I_r и току возбуждения – I_e при синусоидальном напряжении (б)

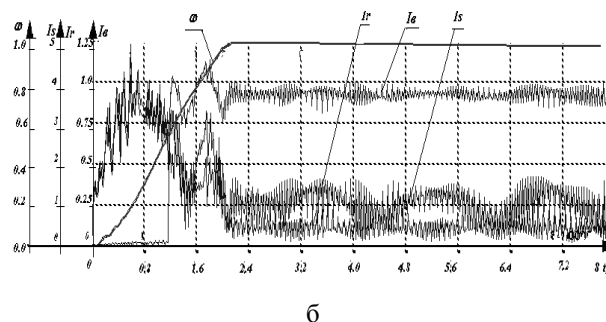
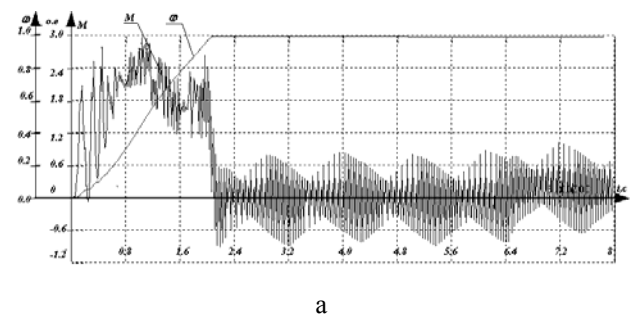


Рис. 2. Переходный процесс по скорости – ω и моменту – M при трапецидальном трехфазном напряжении (а); переходный процесс по скорости – ω , току статора – I_s , пусковой обмотки – I_r и току возбуждения – I_e при трапецидальном напряжении (б)

После включения возбуждения величина пульсаций модулируется низкими частотными колебаниями, обусловленными колебательными свойствами синхронного двигателя, которые составляют величину 0,6 номинального момента (рис. 2, б). Среднее значение пусковых токов статора и короткозамкнутой обмотки при разгоне в 3 раза превышают номинальные значения. Использование ШИП частоты без фильтрующих и регулирующих устройств приводит к пульсациям статорных, следовательно, роторных токов и момента.

Результаты моделирования пуска синхронного двигателя со ступенчатым трехфазным напряжением приведены на рис. 3.

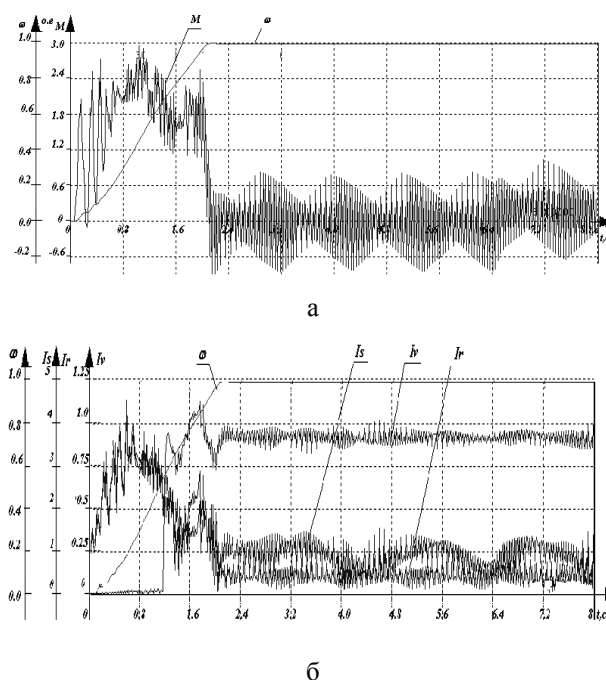


Рис. 3. Переходный процесс по скорости – ω и моменту – M при прямоугольном трехфазном напряжении (а); переходный процесс по скорости – ω , току статора – I_s , пусковой обмотки – I_r и току возбуждения – I_e при прямоугольном напряжении (б)

Характер переходных процессов при прямоугольном фазном напряжении схож с процессами при трапецеидальном фазном напряжении.

После включения возбуждения величина пульсаций модулируется низкими частотными колебаниями, обусловленными колебательными свойствами синхронного двигателя, составляет величину 0,7 номинального момента. При прямоугольном увеличении нагрузки в момент времени $t = 6,4$ с амплитуда пульсаций увеличивается при сохранении частоты модуляции.

На рис. 4 приведены графики потокосцеплений ψ при разных законах модуляции фазного напряжения.

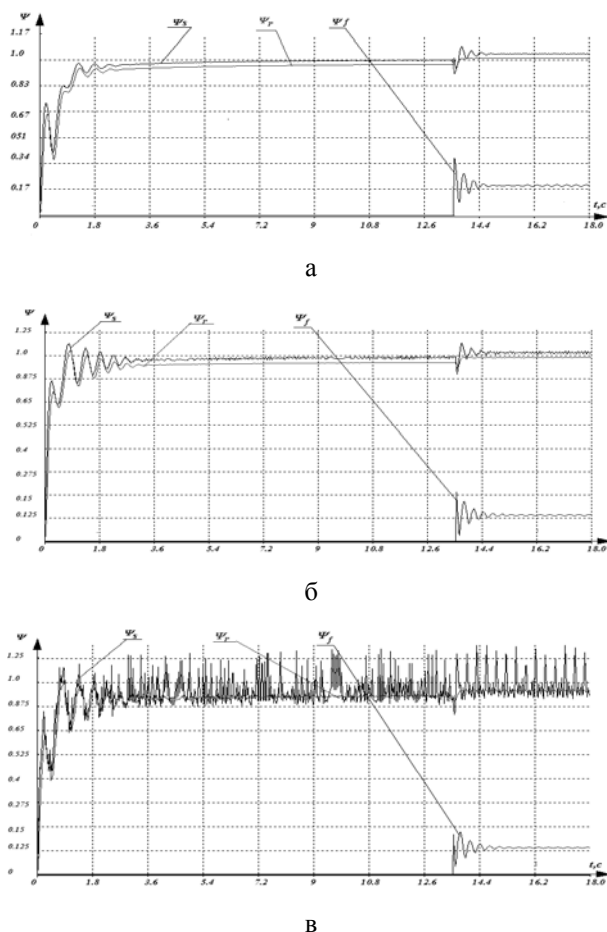


Рис. 4. Графики потокосцеплений ψ при разных законах модуляции фазного напряжения – синусоидальной модуляции (а), трапецеидальной модуляции (б), ступенчатой модуляции (в)

Высокочастотные составляющие, обусловленные формой напряжения и тока, практически не влияют на частоту вращения из-за момента инерции синхронного двигателя и механизма, но при этом ухудшают энергетические показатели системы и влияют на температурный режим статора и ротора двигателя.

Мощность, потребляемая электромеханической системой, для выбранной системы координат и системы дифференциальных уравнений, моделирующих переходные процессы, в общем случае определяется по формуле

$$E = \int_0^{T_k} P dt, \quad (1)$$

где P – мощность, потребляемая синхронным двигателем; T_k – время цикла [7].

На рис. 5 представлены переходные процессы по скорости и относительные потребления электроэнергии за один цикл пуска и нагрузки.

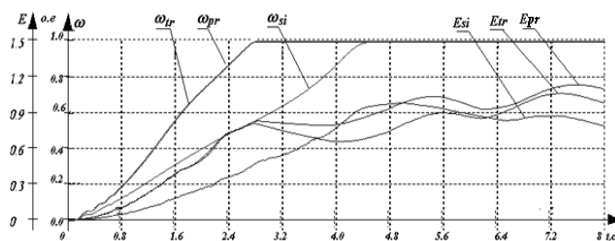


Рис. 5. Переходные процессы по скорости ω и потреблению электроэнергии

На рис. 5 приняты следующие обозначения: ω_{si} , ω_{tr} , ω_{pr} – соответственно для синусоидальной, трапецеидальной и прямоугольной формы фазного напряжения, потребляемая электроэнергия E_{si} , E_{tr} , E_{pr} – соответственно для синусоидальной, трапецеидальной и прямоугольной формы фазного напряжения.

Выводы. Полученные результаты моделирования процесса пуска СЭД показывают, что наличие высокочастотных составляющих в токах двигателя при трапецеидальной и ступенчатой форме фазного напряжения создают дополнительные сложности при реализации сигналов обратных связей, так как при этом требуется наличие фильтров, повышающих порядок системы регулирования и снижающих быстродействие замкнутой системы.

Уровень потребления электроэнергии меньше при синусоидальном фазном напряжении, чем при прямоугольном, несмотря на более длительный период пуска. Вместе с тем, при практически одинаковых показателях переходных процессов при прямоугольном и трапецеидальном фазном напряжении энергетика трапецеидального напряжения предпочтительней.

Список использованной литературы

1. Hioki T., Jamamoto H., Mizuno S., and Jingoish H., (1979), Thyristor Starting System for Okayoshino Power Plant –Toshiba Review, No. 122.
2. Черный А. П. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография / А. П. Черный, А. И. Гладарь, Ю. Г. Осадчук, И. Р. Курбанов, А. Н. Вошун. – Кременчуг : ЧП Щербатых А. В., 2006. – 280 с.
3. Синчук И. О. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления / И. О. Синчук, А. А. Чернышев, И. И. Киба, О. В. Пасько, О. Е. Ключка, О. Е. Мельник : учебное пособие // Под редакцией проф. Синчука О. Н. – Кременчуг : Вид. Щербатых О. В., 2008. – 88 с.

4. Tihanyi L. (1995), *EMC in Power Electronics*, N.Y.: *IEEE Press*, 402 p

5. Вейнгер А. М. Регулируемый синхронный электропривод / А. М. Вейнгер. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с., ил.

6. Рудаков В. В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В. В. Рудаков, И. М. Столяров, В. А. Дартау. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136 с. : ил.

7. Ключев В. И. Теория электропривода : учебник для вузов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с., ил.

8. Синчук О.Н. Моделирование пуска неявнополюсного синхронного электрического двигателя / О. Н. Синчук, В. Ю. Захаров, Д. А. Михайличенко // *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал*. – К. : Техніка. – 2012. – № 08 (84). – С. 24 – 30.

9. L.Serrano, Iribarnegaray, (1993), *The Modern Space Vector Theory, Part I: Its Coherent Formulation and Its Advantages for Transient Analysis of Converter-Fed AC Machines*, *ETEP*, Vol.3, No. 2, March/April, 1993.

10. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р. Т. Шрейнер. – Екатеринбург : УПО РАН, 2000. – 654 с.

11. Sen J and Butterworth N., (1997), *Analysis and Design of a Three-Phase PWM Converter System for Railway Traction Applications*, *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, Vol. 144, No. 5, pp. 357 – 371,

[*The Asynchronous Electric Drives with Vector Management*], (1987), Leningrad, Russian Federation, *Energoatomizdat, Leningr. Department*, 136 p. (In Russian).

7. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov* [The Electric Drive theory: the Manual for Higher Education Institutions], (1985), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 560 p. (In Russian).

8. Sinchuk O.M., Zakharov V.Y., and Mikhaylichenko D.A. *Modelirovanie pusk neyavnopolyusnogo sinhronnogo elektricheskogo dvigatelya* [Modelling of the not Salient pole Synchronous Electric Motor's Start-up], (2012), *Electrotechnical and Computer Systems. Scientific-Technical Journal*, Kiev, Ukraine, *Tekhnika*, No. 08(84), pp. 24 – 30 (In Russian).

9. L.Serrano, Iribarnegaray, (1993), *The Modern Space Vector Theory, Part I: Its Coherent Formulation and Its Advantages for Transient Analysis of Converter-Fed AC Machines*, *ETEP*, Vol.3, No. 2, March/April, 1993.

10. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical Modeling of the Alternating Current Electric Drives with Frequency Semiconductor Converter], (2000), Yekaterinburg, Russian Federation, *URO RAN*, 654 p. (In Russian).

11. Sen J., and Butterworth N. (1997), *Analysis and Design of a Three-Phase PWM Converter System for Railway Traction Applications*, *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, Vol. 144, No. 5, pp. 357 – 371,

Получено 10.07.2014

References

1. Hioki T., Jamamoto H., Mizuno S., and Inogushi H., (1979), *Thruster Starting System for Okayoshino Power Plant* –Toshiba Review, No. 122.

2. Chorniy A.P., Gladar A.I., Osadchuk Yu.G. Kurbanov I.R., and Voshun A.N. *Puskovyie sistemyi ne-reguliruemiyh elektroprivodov: Monografiya* [Starting Systems of the Unregulated Electric Drives: The Monograph], (2006), Kremenchug, Ukraine, *Scherbatykh A.V.*, 280 p. (In Russian).

3. Sinchuk I.O., Chernyshev A.A., Pas'ko O.V., Klyuchka O.E., Kyba I.I., and Melnyk O.E. *Poluprovodnikovyye preobrazovateli elektricheskoy energii v strukturah elektroprivodov. Shemotehnika i printsipy upravleniya* [Semiconductor Converters of the Electric Energy in Structures of the Electric Drives. The Circuitry and Principles of its Management], (2008), *Manual. Under the Edition by prof. Sinchuk O.M.*, Kremenchug, Ukraine, *Shcherbatykh O.V.*, 88 p. (In Russian).

4. Tihanyi L., (1995), *EMC in Power Electronics*, N.Y.: *IEEE Press*, 402 p.

5. Veynger A.M. *Reguliruemyyi sinhronnyiy elektroprivod* [Adjustable Synchronous Electric Drive], (1985), Moscow, Russian Federation, *Energoatomizdat*, 224 p. (In Russian).

6. Rudakov V.V., Stolyarov I.M., and Dartau V.A. *Asinhronnyie elektroprivodyi s vektornym upravleniem*



Юрченко
Олег Николаевич,
д-р техн. наук, ст. научный
сотрудник, зав. отделом тран-
зисторных преобразователей
ИЭД НАН Украины.
г. Киев-57, пр. Победы, 56.
E-mail:yuon@ied.org.ua



Михайличенко
Дмитрий Анатольевич,
ст. преподаватель каф. систем
электропотребления и энерге-
тического менеджмента
Кременчугского нац. ун-та
им. Михаила Остроградского.
Украина, г. Кременчуг,
ул. Первомайская. 20.
E-mail: emdenn@mail.ru.