

О. Н. СИНЧУК, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, «КНУ», Кривой Рог;
Д. А. МИХАЙЛИЧЕНКО, ст. преподаватель, «КрНУ им. М. Остроградского», Кременчуг

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПУСКЕ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БАЗЕ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Введение. Пуск мощных синхронных электрических двигателей (СЭД) имеющих большие моменты инерции, как правило, производится при помощи пусковых устройств (ПУ), в т.ч. на основе полупроводниковых преобразователей электрической энергии [1-3].

Улучшить точность регулирования скорости и быстродействие при пуске СЭД с сохранением и улучшением энергетики можно с помощью замкнутых систем регулирования [4].

Последние варианты ПУ позволяют достичь достаточной эффективности процесса пуска путём достижения требуемых выходных электрических параметров. В значительной степени это дополняется применением замкнутых систем регулирования [4,5].

Вместе с тем, использование возможно достижимого потенциала эффективности процесса пуска комплекса: ПУ – СЭД не может быть достигнуто без создания и реализации соответствующего алгоритма поведения данного комплекса. В свою очередь, данный алгоритм в своей комплексности не может быть достаточно реализован в практику работы без наличия достаточного математического обеспечения, в т.ч. безадекватной математической модели синхронного двигателя (СД), оценкой и выбором наиболее подходящего из возможных способа формирования выходных форм кривых тока и напряжения широтно-импульсного преобразователя (ШИП) при широтно-импульсной модуляции (ШИМ), синтезом системы регулирования и анализом переходных процессов в электротехническом комплексе управляемого запуска [6].

Цель работы: Анализ переходных процессов при управлении пуском СД с использованием замкнутой системы регулирования на базе модели ШИП и математической модели синхронного двигателя построенной в координатах тока статора I_s и потокоцепления статора ψ_s [7,8].

Материалы исследования. Для исследования использована математическая модель СЭД в основу построения которой положена обобщенная система дифференциальных уравнений СЭД Парка – Горева в векторной форме записи [5,7,8].

Для реализации ШИМ управления автономным инвертором авторами использован алгоритм формирования пространственного вектора напряжения [9]. При моделировании приняты параметры серийного СД ДС260/44-36УХЛ4. Решение поставленной задачи проводилось в программной среде Фортран.

Структурная схема частотного регулирования скорости и стабилизации магнитного потока представлена на (рис.1).

Замкнутый контур регулирования обеспечит повышение быстродействия и точность регулирования скорости. Контур с обратной связью, воздействующий на напряжение синхронного двигателя, предназначен для поддержания необходимой перегрузочной способности. При этом осуществляется стабилизация магнитного потока.

Рассмотрим и сравним процессы в системе с трапецеидальным фазным напряжением и в системе с синусоидальным фазным напряжением. Рассмотрим систему с контурами регулирования тока и напряжения при синусоидальной форме фазного напряжения с коэффициентами датчика частоты вращения и напряжения $K_{OC} = k_{ДН} = 0,2$ и $K_{OC} = k_{ДН} = 0,4$.

Переходный процесс по частоте вращения приведен на (рис.2.)

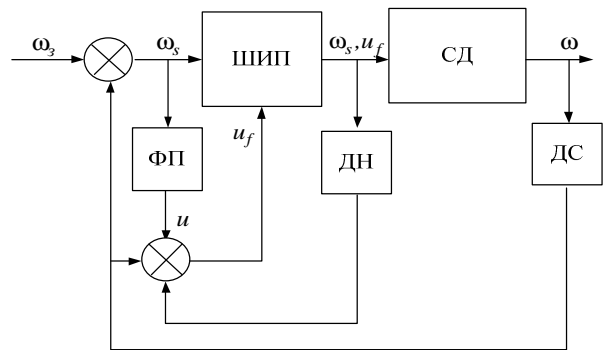


Рис. 1 – Структурная схема замкнутой системы регулирования по частоте вращения и напряжению

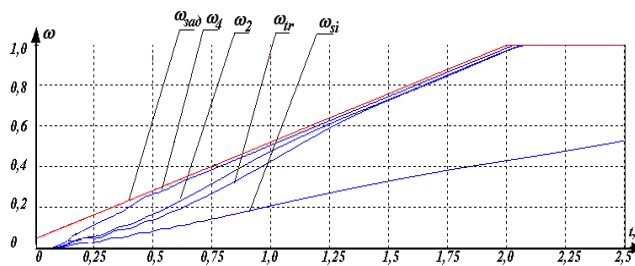


Рис. 2 – Переходный процесс по частоте вращения

На (рис.2) приняты следующие обозначения: $\omega_{зад}$ – заданная частота вращения; ω_{tr} – частота вращения при трапецидальном напряжении разомкнутой системы; ω_{si} – частота вращения при синусоидальном напряжении разомкнутой системы; ω_d – частота вращения замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,4$; ω_2 – частота вращения замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,2$.

По результатам расчета видно, что наиболее точно обрабатывает заданное воздействие система регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,4$. После достижения времени $t=1,25c$ графики переходных процессов замкнутых систем регулирования при трапецидальном напряжении практически одинаковы. Наибольшее расхождение до 50% наступает при $t=0,5c$.

На (рис.3) приведены переходные процессы по частоте вращения ω и соответственно по моменту M для исследуемых систем. Максимальные пиковые моменты присутствуют в замкнутой системе и превышают пиковые моменты других систем на 20%.

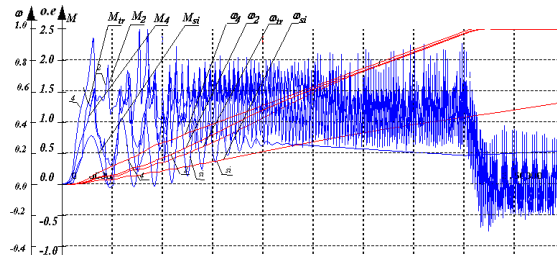


Рис.3 – Переходные процессы по частоте вращения ω и моменту M синхронного двигателя

На (рис.3) приняты соответствующие обозначения: M_{tr} – момент при трапецидальном напряжении разомкнутой системы; M_{si} – момент при синусоидальном напряжении разомкнутой системы; M_d – момент замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,4$; M_2 – момент в замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,2$.

Графики переходных процессов по частоте вращения и тока статора приведены на (рис.4). Пики тока в замкнутых системах регулирования отличаются не больше чем на 10%.

Определение содержания высших гармонических составляющих в расчетных токах статора позволит определить величину потребляемой электроэнергии и параметры выходного фильтра широтно-импульсного преобразователя частоты, что значительно улучшит тепловой режим синхронного двигателя.

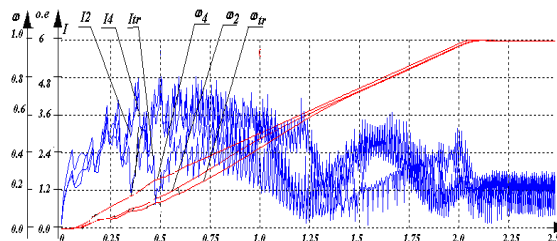


Рис. 4 – Переходные процессы по частоте вращения ω и току статора I синхронного двигателя

На (рис.4) приняты соответственно следующие обозначения: I_{tr} – частота вращения и момент при трапецидальном напряжении разомкнутой системы; I_d – момент замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,4$; I_2 – момент замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,2$.

Окончательный выбор системы и настройки коэффициентов следует производить после анализа энергетических характеристик синхронного двигателя, которые приведены на (рис.5.)

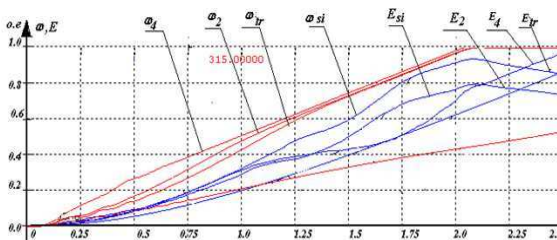


Рис. 5 – Переходные процессы по частоте вращения и потреблению электроэнергии синхронным двигателем

На (рис.5) приняты обозначения: E_{tr} – потребляемая электроэнергия при трапецидальном напряжении разомкнутой системы; E_{si} – потребляемая электроэнергия при синусоидальном напряжении разомкнутой системы; E_4 – потребляемая электроэнергия замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC} = 0,4$; E_2 – потребляемая электроэнергия замкнутой системы регулирования с коэффициентом обратной связи $K_{OC} = 0,2$.

Переходные процессы замкнутой системы регулирования для синхронного двигателя с гладким ротором без пусковой обмотки для оптимального коэффициента обратной связи $K_{OC}=0,2$ при синусоидальной трапецидальной и ступенчатой модуляции выходного напряжения, приведенные на (рис.6. а), б), в)).

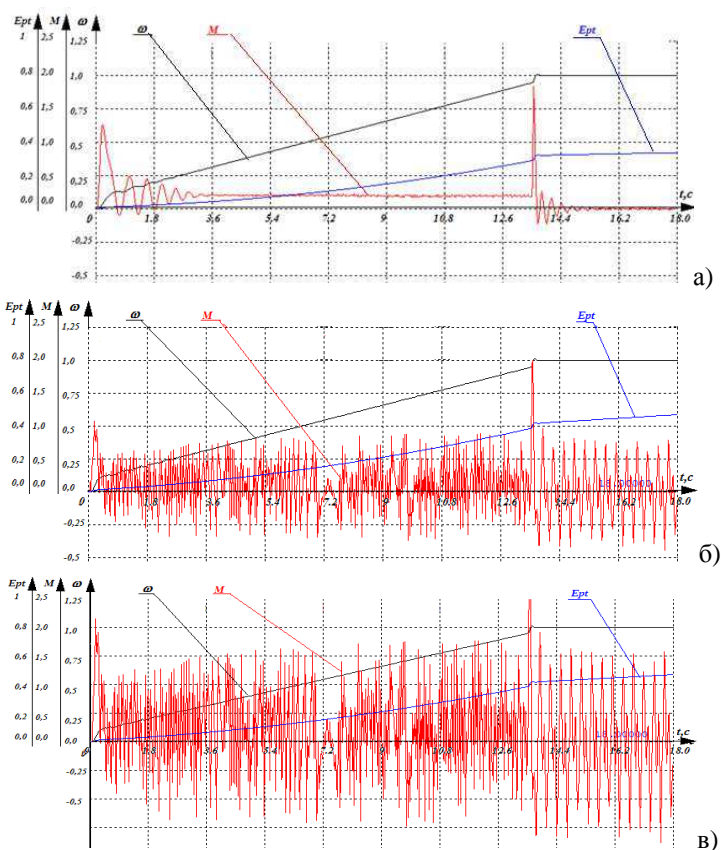


Рис. 6 – Линейный пуск двигателя со стабилизацией потокосцепления и синусоидальной модуляцией фазного напряжения (а), трапецидальной модуляцией фазного напряжения (б), ступенчатой модуляцией фазного напряжения (в)

Пусковые характеристики различаются в зоне низких скоростей вращения ротора. При этом, более гладкое изменение момента двигателя имеет место при синусоидальной модуляции (рис. 6 а).

Следует отметить особенность замкнутых систем со стабилизацией магнитного потока (рис. 7 а), б), в)) заключающуюся в увеличении пиковых амплитуд токов и потокосцеплений, следовательно, и момента синхронного двигателя при трапецидальной и ступенчатой модуляции на 100-200% по сравнению с синусоидальной модуляцией фазного напряжения.

Выводы. Анализ результатов моделирования процесса пуска СЭД с использованием САР показывает, что за время пуска двигателя в течение $t=2,5$ с потребление электроэнергии на 10% меньше в замкнутой САР с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,2$, чем при коэффициенте $K_{OC}=0,4$ и трапецидальной форме кривой напряжения.

По результатам моделирования следует считать оптимальной систему с замкнутой САР по частоте вращения и напряжению с коэффициентом обратной связи $K_{OC}=0,2$ и синусоидальным фазным напряжением.

Список литературы: 1. Черный А.П., Гладарь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280с.

2. Tihanyi, L. EMC in Power Electronics / L. Tihanyi. – N.Y.: IEEE Press, 1995. – 402 с. 3. В.І. Сенько, М.В.Панасенко, Є.В. Сенько, М.М. Юрченко, Л.І.Сенько, В.В.Ясінський. Електроніка і мікросхемотехніка /У4-х т.Том 4. У2-х кн. – Силова електроніка: Підручник / За ред..В.І.Сенька. – Київ: Каравела, 2013. – 956 с. 4. Терехов В.М. Системы управления электроприводов: Учебник для вузов / В.М. Терехов, И.О. Осипов – М.: Изд. центр «Академия», 2006. – 680с. 5. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с., ил. 6. Синчук И.О. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления./ Синчук И.О., Чернышев А.А., Киба И.И., Пасько О.В., Ключка О.Е., Мельник О.Е./ Учебное пособие. Под редакцией проф. Синчука О.Н. – Кременчуг, Вид. Щербатых О.В., 2008. – 88с. 7. Вейнгер А.М. Регулируемый синхронный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224с., ил. 8. Синчук О.Н. Захаров В.Ю., Михайличенко Д.А. Моделирование пуска неявнополюсного синхронного электрического двигателя // Электротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. – Київ, «Техніка», 2012. – Вип. №08(84). – с.24-30. 9. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер// – Екатеринбург: УРО РАН.- 2000. – 654с.

Bibliography (transliterated): 1. Chorniy A.P., Gladar A.I., Osadchuk Yu.G. Kurbanov I.R. Voshun A.N. Puskovyie sistemy nereguliruemyyih elektroprivodov: Monografiya [Starting systems of the unregulated electric drives: The monograph] – Kremenchug: Scherbatykh A.V., 2006. – 280p. (In Russian). 2. Tihanyi, L. EMC in Power Electronics / L. Tihanyi. – N.Y.: IEEE Press, 1995. – 402 p. 3. V.I. Senko, M.V.Panasenko, E.V. Senko, M.M. Yurchenko, L.I.Senko, V.V.Yasinskiy. Elektronika i mikroshemotekhnika / U4-h t.Tom 4. U2-h kn. – Silova elektronika: Plidruchnik / Za red..V.I.Senka. – Kiyiv: Karavela, 2013. – 956 p. (In Ukrainian). 4. Terekhov V. M. Sistemy upravleniya elektroprivodov: Uchebnik dlya vuzov [Control systems of electric drives] / Terekhov V. M., I.O. Osipov – M.: Izd. tsentr «Akademiya», 2006. – 680 p. (In Russian). 5. Klyuchev V.I. Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov [The electric drive theory: the manual for higher education institutions] – M.: Energoatomizdat, 1985. – 560p. (In Russian). 6. Sinchuk I.O. Semiconductor converters of the electric energy in structures of the electric drives. The circuitry and principles of its management./Sinchuk I.O., Chernyshev A.A., Pas'ko O. V., Klyuchka O. E., Kyba I.I., Melnyk O.E./Manual. Under the edition by prof. Sinchuk O.M. – Kremenchug, Shcherbatykh O. V., 2008. – 88p. (In Russian). 7. Veynger A.M. Reguliruemyyi sinhronnyiy elektroprivod [Adjustable synchronous electric drive] – M.: Energoatomizdat, 1985. – 224p. (In Russian) 8. Sinchuk O.M., Zakharov V.Y., Mikhaylichenko D.A. Modelirovanie puska neyavnopolysnogo sinhronnogo elektricheskogo dvigatelya [Modelling of the not salient pole synchronous electric motor's start-up] // Electrotechnical and computer systems. Scientific-technical journal. – Kyiv, "Tekhnika", 2012. – Ed. No. 08(84). – page 24-30. Print. (In Russian). 9. Shreyner R. T. Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty [Mathematical modeling of the alternating current electric drives with frequency semiconductor converter] /R.T. Shreyner// – Yekaterinburg: URO RAN. - 2000. – 654p. (In Russian).

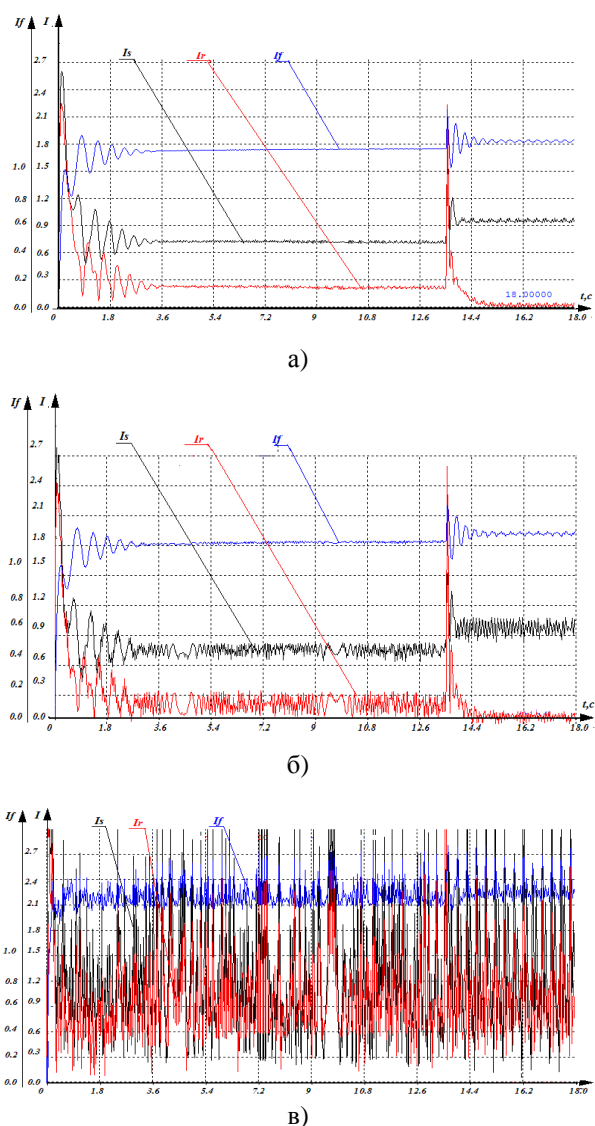


Рис.7 – Переходный процесс токов при линейном пуске двигателя замкнутой системы - синусоидальной модуляцией фазного напряжения (а), трапецидальной модуляцией фазного напряжения (б), ступенчатой модуляцией фазного напряжения (в)

Поступила (received) 20.08.2015