

*Л. П. ГАЛАЙКО*, канд.техн.наук, доц. НТУ «ХПИ»

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПУСКА В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В статье рассматривается вопрос анализа влияния закона изменения управляющих параметров на характер переходных процессов в режиме пуска в вентильно-индукторном двигателе рудничного электровоза с помощью разработанных моделей для программы Simulink пакета программ Matlab. Приведены результаты расчетов на этих моделях для двигателя мощностью 27 кВт и частотой вращения 1215 об/мин.

**Ключевые слова:** Вентильно-индукторный двигатель, режим пуска, модель, программа Simulink, пульсации момента.

### **Введение**

Вентильно-индукторные двигатели (ВИД, за рубежом Switched Reluctance Motors) находят все более широкое применение за рубежом в различных областях техники. Главные достоинства двигателей: простота конструкции, низкая стоимость электромеханического преобразователя и возможность формирования средствами управления любой механической характеристики, что позволяет использовать их для любых приводов. Наиболее просто формируются характеристики с постоянной скоростью или с незначительным ее изменением. Задача существенно усложняется при значительном диапазоне изменения скорости. Такие характеристики имеют двигатели для различных видов транспорта. Эти характеристики имеют участки: с постоянным моментом, с постоянной мощностью и с постоянной скоростью. В работе [7] была поставлена задача: исследовать переходные процессы для всех этих режимов с помощью имитационных моделей в программе Simulink пакета программ Mathlab. Основная модель была разработана автором статьи в 2005 году и описана в работе [3]. Для апробации модели был проведен расчет переходного процесса прямого пуска ВИД. Результаты расчета на модели сравнивались с результатом расчета по программе на языке Паскаль, также разработанной автором и описанной в работе [2]. Расхождение результатов было незначительным. Для моделирования более сложных регулируемых переходных процессов разрабатывались дополнительные субмодели, которые добавлялись к основной модели. Таким образом, были исследованы переходные процессы для режима рекуперативного торможения при постоянной скорости [8], для режима постоянства мощности [9] и режима регулируемого пуска при поддержании примерно постоянной величины пускового момента [4]. При исследовании этих режимов была использована информация, приведенная в работах [1, 5, 6].

В работе [1] при анализе режима пуска основное внимание уделено проблеме снижения пульсаций момента. Авторы приводят достигнутый

© Л.П. Галайко, 2014

результат в решении этой проблемы – 9 %, однако, они не объясняют, каким образом он достигнут. Отсутствуют графики переходных процессов, иллюстрирующие этот результат. В работе [4] автор данной статьи приводит результаты расчета переходного процесса регулируемого пуска с помощью модели для программы Simulink для ВИД мощностью 27 кВт и частотой вращения 1215 об/мин. Однако в данной работе не приведены законы изменения управляющих параметров и полученный результат по уменьшению пульсаций момента нельзя признать удовлетворительным.

**Цель работы:** Продолжить работы по разработке дополнительных субмоделей к основной модели, описанной в работе [3], для проведения анализа влияния законов изменения управляющих параметров на характер переходных процессов в режиме пуска. Провести расчеты переходных процессов пуска вентильно-индукторного двигателя при отсутствии регулирования управляющих параметров и при разных законах изменения управляющих параметров с целью определения законов, обеспечивающих минимальные пульсации мгновенного значения момента.

**Описание расчетного эксперимента.** Исследования проведены на примере четырехфазного ВИД мощностью 27 кВт, частотой вращения 1215 об/мин, спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, который выпускается серийно. В эксперименте исследовалось влияние следующих управляющих параметров (УП): 1) угол включения  $\theta_{on}$ , угол между полюсами ротора и статора, при котором происходит подача напряжения на катушки фазы; 2) угол отключения  $\theta_{off}$ , угол между полюсами ротора и статора, при котором отключают напряжение; 3) релейное регулирование величины тока (задание  $I_{max}$  и  $I_{min}$ ).

На рисунках 1, 2, 3 приведены графики, иллюстрирующие результаты эксперимента по исследованию процесса прямого пуска. Исходные данные эксперимента: напряжение 200 В, момент сопротивления 200 Н·м,  $\theta_{on} = 22^\circ$ ,  $\theta_{off} = 7^\circ$ ,  $I_{max} = 260$  А,  $I_{min} = 240$  А, момент инерции 0,4 кг·м. Время пуска 0,29 с. Установившаяся угловая скорость равна 58,59 рад/с вместо необходимой 120 рад/с. Для увеличения скорости были увеличены значения  $I_{max} = 300$  А и  $I_{min} = 280$  А. Установившаяся скорость возросла незначительно до значения 63,28 рад/с. Дальнейшее увеличение токов нецелесообразно, так как требует значительного увеличения установленной мощности инвертора.

При постоянных управляющих параметрах  $\theta_{on} = 22^\circ$ ,  $\theta_{off} = 7^\circ$  как видно на рис. 1, 2, 3 значение момента при увеличении скорости непрерывно уменьшается. Для обеспечения постоянства момента и, следовательно, постоянства ускорения в большей части переходного процесса пуска необходимо изменять  $\theta_{on}$  и  $\theta_{off}$  по специальному закону. На рис. 4, 5, 6 приведены графики для регулируемого процесса пуска.

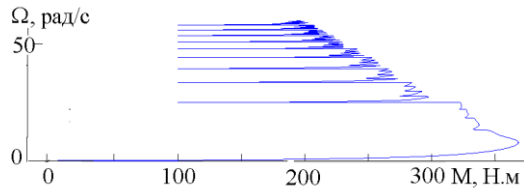


Рис. 1 – Зависимость угловой скорости от среднего значения момента при прямом пуске

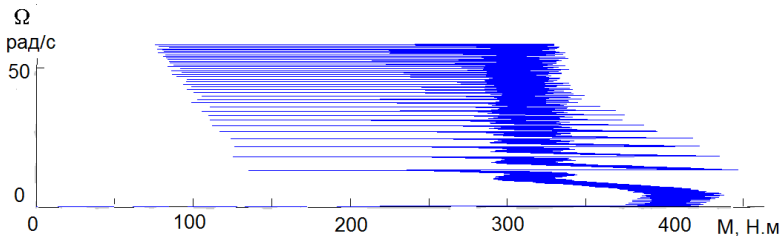


Рис. 2 – Зависимость угловой скорости от мгновенного значения момента при прямом пуске

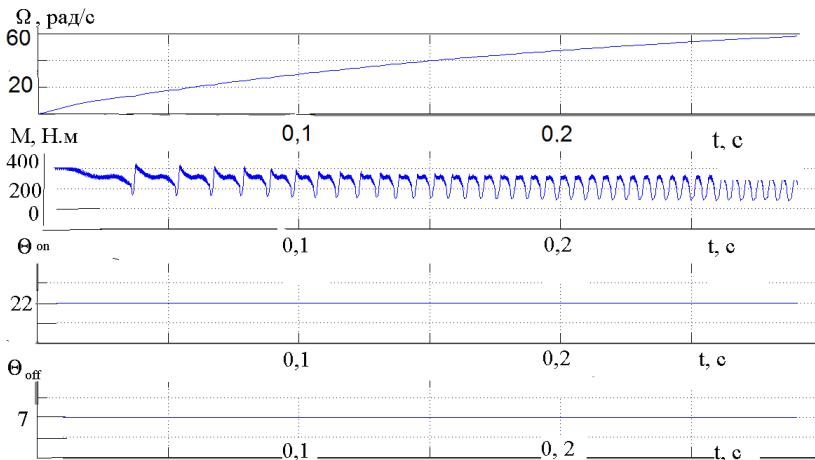


Рис. 3 – Зависимость угловой скорости, мгновенного значения момента, угла включения  $\theta_{on}$  и угла отключения  $\theta_{off}$  от времени при прямом пуске

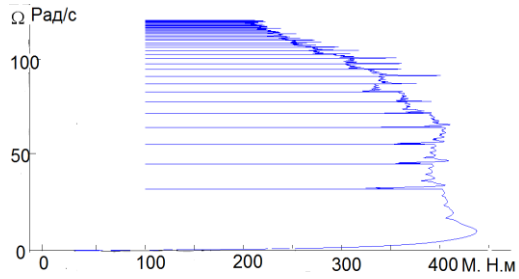


Рис. 4 – Зависимость угловой скорости от среднего значения момента в процессе регулируемого пуска

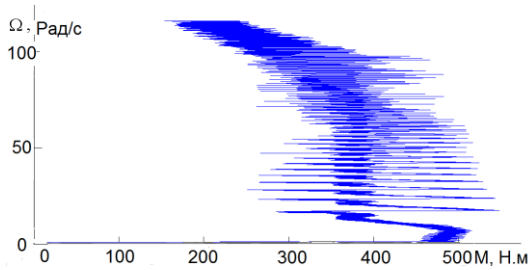


Рис. 5 – Зависимость угловой скорости от мгновенного значения момента при регулируемом пуске

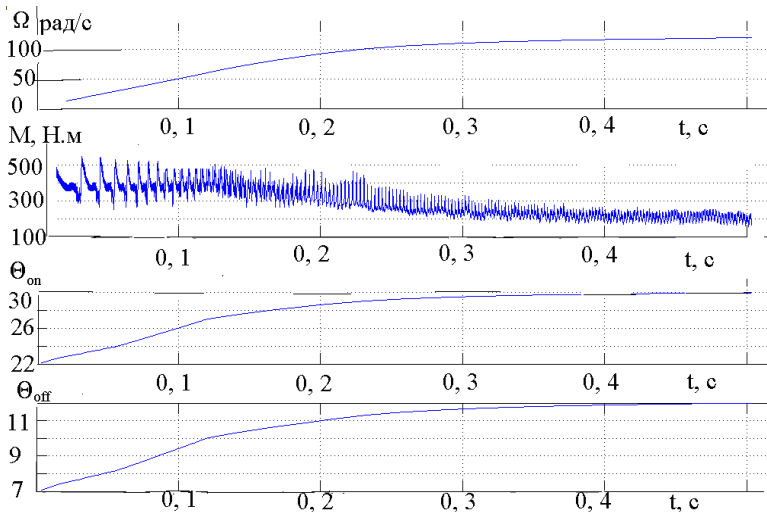


Рис. 6 – Зависимость угловой скорости, мгновенного значения момента, угла включения  $\theta_{on}$  и угла отключения  $\theta_{off}$  от времени при регулируемом пуске

Во время переходного процесса углы  $\theta_{on}$  и  $\theta_{off}$  непрерывно изменялись по закону, заданному в блоке Look-up Table. Зависимость углов  $\theta_{on}$  и  $\theta_{off}$  от скорости приведена на рис. 6. В конце переходного процесса получено:  $\theta_{on} = 30^\circ$ ,  $\theta_{off} = 12^\circ$ , угловая скорость – 120 рад/с, пульсации момента – 20 %. В переходном процессе пульсации момента постепенно уменьшались от 31 % вначале до 20 % в конце. Непрерывное изменение углов включения предполагает использование либо бездатчиковой системы управления, либо комбинированной системы – использование датчиков положения ротора и программного определения углов.

### **Выводы.**

Как показали расчеты, применение прямого пуска нецелесообразно, так как требует значительного увеличения пускового тока, что приводит к необходимости увеличения установленной мощности инвертора. Регулируемый пуск с использованием непрерывного изменения углов включения и отключения позволяет обеспечить качественный переходной процесс пуска, однако, для его реализации требуется разработка более сложной программы для контроллера микропроцессора. Хорошим тренажером для отладки этой программы является имитационное моделирование в программе Simulink пакета программ Matlab.

**Список литературы:** 1. Л.Ф.Коломойцев и др. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем./ Известия вузов. Электромеханика. №2. 2002г., С. 18 – 22. 2. Л.П. Галайко. Пуск вентильно-индукторного двигателя. // Вестник НТУ «ХПИ» 11'2003, С.24-27. 3. Галайко Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах. // Вестник НТУ «ХПИ» 48'2005, Харьков, 2005, С. 24-27. 4. Л.П.Галайко. Анализ переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе в режиме пуска. // Вестник НТУ «ХПИ» 20'2014, Харьков, С. 35 – 38. 5. Л.П.Галайко. Формирование механической характеристики вентильно - индукторного двигателя рудничного электровоза. // Вестник НТУ «ХПИ» 44'2009, Харьков, С. 48 – 51. 6. Л.П.Галайко, И.А. Голосный. Исследование режима постоянной мощности вентильно – индукторного двигателя рудничного электровоза. // Вестник НТУ «ХПИ» 35'2005, Харьков, С. 43 – 46. 7. Galayko L.P. Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor. ABSTRACTS. ICEEE – 2010, 13<sup>th</sup> International Conferense on Electromechanics, Electrotechology, Electromaterials and Components. September 19 – 25, 2010, Alushta, Crimea, Ukraine, P. 96. 8. Galayko L.P. Analysis recuperative braking mode in simulation model of switched reluctance motor. ABSTRACTS. ICEEE – 2012, 14<sup>th</sup> International Conferense on Electromechanics, Electrotechology, Electromaterials and Components. September 23 – 29, 2012, Alushta, Crimea, Ukraine, P. 144 - 146. 9. Л.П. Галайко. Имитационное моделирование режима постоянства мощности вентильно- индукторного двигателя рудничного электровоза. // Вестник НТУ «ХПИ» 15'2013, Харьков, С. 105 – 109.

**Bibliography (transliterated):** 1. L.F. Kolomoitsev, etc. "Operation modes of a railway drive of a mine electric locomotive with a three-phase reluctance induction motor". *Electromechanics*. No. 2. 2002. [Print]. 2. L.P. Galayko. "Start of a Swithed Reluctanse Motor". *Visnyk NTU "HPI"*. No 11 (2003). Kharkiv: NTU "HPI". 2003. 24-27. [Print]. 3. Galayko L.P. "Imitation modeling of a Swithed Reluctanse Motor in transients". *Visnyk NTU "HPI"*. No. 48 (2005). Kharkiv: NTU "HPI". 2005. 24-27. [Print]. 4. Analysis of transient modes of a swithed reluctance motor of operation in regime of starting. *Vestnik NTU "HPI"*. No. 20 (2014). Kharkiv: NTU "HPI". 2005. 35 – 38. [Print]. 5. Galajko L.P. "Formirovanie mehanicheskoy harakteristiki ventil'no-induktornogo dvigatelja rudnichnogo jelektrovoza". *Vestnik NTU "HPI"* No. 44 (2009). Kharkiv: NTU "HPI". 2009. 48-51. [Print]. 6. Galajko L.P., Golosnyj I.A. "Issledovanie rezhima postojannoij moshhnosti ventil'no-induktornogo dvigatelja

rudnichnogo jelektrovoza". *Vestnik NTU "HPI"*. No. 35 (2005). Kharkiv: NTU "HPI". 2005. 43-46. [Print].

7. Galayko L.P. "Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor." *ICEEE-2010. 13<sup>th</sup> International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components*. September 19-25, 2010. Alushta, Crimea, Ukraine, P. 96. [Print].

8. Galayko L.P. Analysis recuperative braking mode in simulation model of switched reluctance motor. *ABSTRACTS. ICEEE – 2012, 14<sup>th</sup> International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components*. September 23 – 29, 2012, Alushta, Crimea, Ukraine, P. 144 - 146. [Print].

9. Л.П. Галайко. Imitation modeling rezhima postojannoj moshhnosti ventil'no-induktorного dvigatelja rudnichnogo jelektrovoza". *Vestnik NTU "HPI"*. No. 15 (2013). Kharkiv: NTU "HPI". 2013. 105 – 109. [Print].

*Поступила (received) 1.09.2014*



**Галайко Лидия Петровна**, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты соответственно в 1960 и 1969 гг. Доцент кафедры «Электрические машины» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» с 1975г. Научные интересы связаны с проблемами специальных электрических машин, в частности, вентильно-индукторных.