

УДК 621.313.2

Л. П. ГАЛАЙКО

**АНАЛИЗ РЕЖИМА ПОСТОЯНСТВА МОЩНОСТИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧИСЛА ВИТКОВ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В статье рассматривается вопрос анализа влияния закона изменения управляющих параметров на характер переходных процессов в режиме постоянства мощности в вентильно-индукторном двигателе рудничного электровоза с помощью разработанных моделей для программы Simulink пакета программ Matlab. В качестве управляющих параметров выбраны число витков фазы, угол включения  $\Theta_{on}$  и угол отключения  $\Theta_{off}$ . Приведены результаты расчетов на этих моделях для двигателя мощностью 27 кВт и частотой вращения 1215 об/мин.

**Ключевые слова:** вентильно-индукторный двигатель, режим постоянства мощности, модель, программа Simulink, пульсации момента.

**Введение.** Режим постоянства мощности  $P=\text{const}$  является одним из основных режимов двигателя для различных приводов, в частности для транспортных установок. Разработке и исследованию этого режима работы вентильно-индукторного двигателя (ВИД) посвящены работы [1, 2, 3].

В работе [1, 2] рассмотрен один способ управления режимом  $P=\text{const}$ : фазовое регулирование, т.е. изменение момента подачи импульса напряжения на катушки фаз и длительности импульса. Определен допустимый диапазон изменения скорости в этом режиме для линейного режима работы и режима с локальным насыщением исходя из условия уменьшения тока фазы до нуля перед следующим циклом коммутации. Влияние скорости на пульсации момента не анализируется. Для анализа используется модель для программы Simulink, разработанная на основе упрощенных магнитных характеристик.

В работе [3] предложено 4 способа регулирования для обеспечения данного режима (фазовое регулирование, изменение величины питающего напряжения, изменение числа витков, использование подмагничивания). Для реализации последнего способа необходимо, чтобы ток фазы не уменьшался до нуля перед следующим циклом коммутации. При этом для того, чтобы не было непрерывного роста тока, необходимо очевидно ограничить максимум тока. Кроме того, использование этого способа требует применения методики расчета, которая учитывает взаимную индуктивную связь соседних фаз. В работе приведено сравнение расчетных данных с экспериментальными, что является достоинством этой работы. Однако результаты исследования имеют частный характер для двигателя определенной геометрии, которая даже не приведена в статье, и эти результаты трудно использовать для двигателей другой геометрии. В работах [1–3] также отсутствует описание переходного процесса в режиме  $P=\text{const}$ .

С учетом приведенных замечаний автором статьи были разработаны имитационные модели для программы Simulink пакета программ Matlab, которые используют магнитные характеристики, учитывающие реальное насыщение и полученные с помощью программы FEMM. Были разработаны две модели: одна для установившегося режима [4] и вторая для переходного режима [5].

В работах [6, 7] проведен анализ с помощью мо-

дели для установившегося режима двух способов регулирования (фазовое регулирование и изменение числа витков путем переключения соединения катушек фазы с последовательного соединения на параллельное соединение) для двух типов двигателей: 1) мощность 13 кВт, частота вращения 650 об/мин, напряжение 130 В; 2) мощность 14 кВт, частота вращения 1215 об/мин, напряжение 220 В. В этих работах отсутствует анализ переходного процесса от одного режима работы к другому. Анализ этих процессов необходим для разработки качественной программы для микропроцессора контроллера. Наиболее просто и наглядно эти процессы можно проанализировать с помощью имитационной модели для программы Simulink пакета программ Matlab. Вопросу создания и использования имитационных моделей для анализа динамических режимов ВИД, в том числе при постоянной мощности, посвящены работы [8, 9, 10, 11, 12].

В работе [10] проведен анализ переходных процессов в режиме постоянства мощности с использованием фазового регулирования. При задании закона изменения углов включения и отключения  $\Theta_{on}$  и  $\Theta_{off}$  (углов между полюсами статора и ротора, при которых включаются и отключаются транзисторы, подающие напряжение на катушки фаз) за основу были взяты результаты расчета, приведенные в табл. 1 в работе [6]. Однако расчеты показали, что закон изменения углов, полученный для установившихся режимов, не обеспечивает режим постоянства мощности в переходных режимах и его необходимо корректировать. Результат расчета, приведенный на рис. 6 в работе [6], получен для скорректированного закона, однако этот результат нельзя считать удовлетворительным по точности поддержания постоянства мощности.

В работах [11, 12] приведены результаты расчетов, которые показали возможность существенного повышения точности поддержания постоянства мощности с помощью фазового регулирования. Исследования проведены для четырехфазного ВИД мощностью 27 кВт, номинальной частотой вращения 1215 об/мин и максимальной частотой вращения 3645 об/мин. Двигатель спроектирован для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, который выпускается серийно. Число витков фазы было выбрано исходя из условия обеспечения оптимального режима работы в номинальном режиме с минимумом коэффициента пульсаций момента. При

© Л. П. Галайко, 2015

увеличении частоты вращения для обеспечения режима постоянства мощности необходимо увеличивать угол включения  $\Theta_{on}$ . При этом существенно ухудшается форма тока и растет коэффициент пульсаций момента.

**Цель работы.** С помощью разработанной автором модели провести расчеты переходных процессов при изменении момента нагрузки, в которых с помощью изменения углов включения и отключения, а также изменения числа витков будет обеспечен режим постоянства мощности при минимуме пульсаций момента.

**Описание расчетного эксперимента.** Оптимальное решение поставленной задачи, очевидно, предполагает непрерывное уменьшение числа витков с одновременной корректировкой углов включения и отключения. Однако конструктивное исполнение такого изменения числа витков весьма затруднительно. Поэтому для уменьшения пульсаций момента на

больших скоростях в работе [6] было принято решение уменьшить число витков фазы вдвое путем переключения катушек фазы с последовательного соединения на параллельное соединение. Однако при уменьшении числа витков увеличивается максимальное значение тока фазы, особенно на меньшей скорости. Допустимое максимальное значение тока фазы регламентируется допустимым режимом работы полупроводникового преобразователя. По этому критерию выбирается значение скорости, при которой осуществляется переключение соединений катушек фазы.

Были проведены расчетные эксперименты при постоянном числе витков и при переключении числа витков при угловой скорости  $\Omega = 240$  рад/с при изменении скорости от 120 рад/с до 360 рад/с. Ниже приведены графики, иллюстрирующие переходные процессы в этих экспериментах (слева при постоянном числе витков, справа при переключении числа витков).

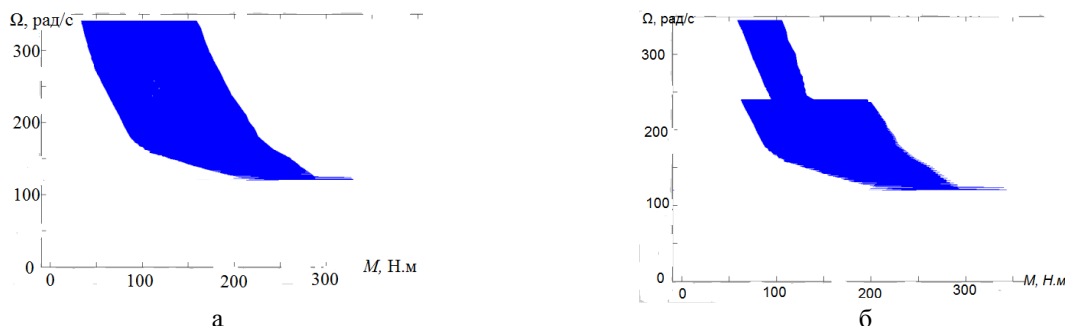


Рис. 1 – Зависимость угловой скорости от мгновенного значения момента:  
а – при отсутствии регулирования числа витков; б – при наличии регулирования числа витков.

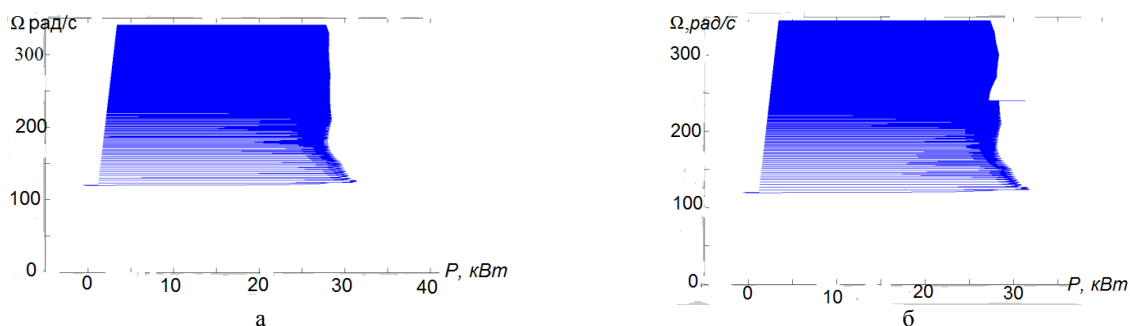


Рис. 2 – Зависимость угловой скорости от значения средней мощности:  
а – при отсутствии регулирования числа витков; б – при наличии регулирования числа витков.

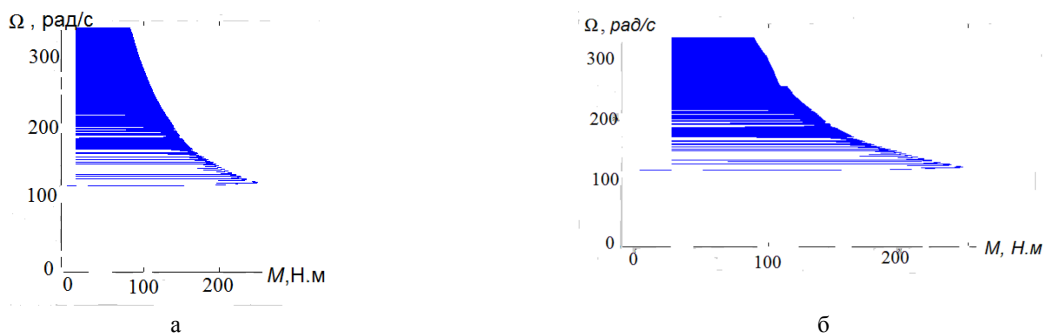


Рис. 3 – Зависимость угловой скорости от значения среднего момента:  
а – при отсутствии регулирования числа витков; б – при наличии регулирования числа витков.

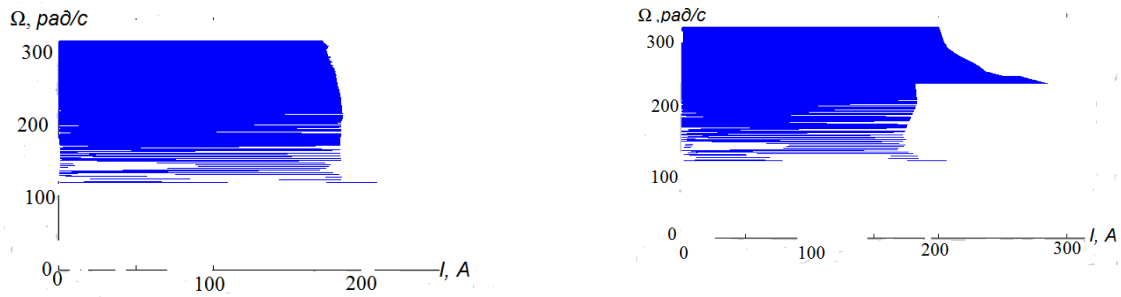


Рис. 4 – Зависимость угловой скорости от значения максимального тока фазы:  
а – при отсутствии регулирования числа витков; б – при наличии регулирования числа витков.

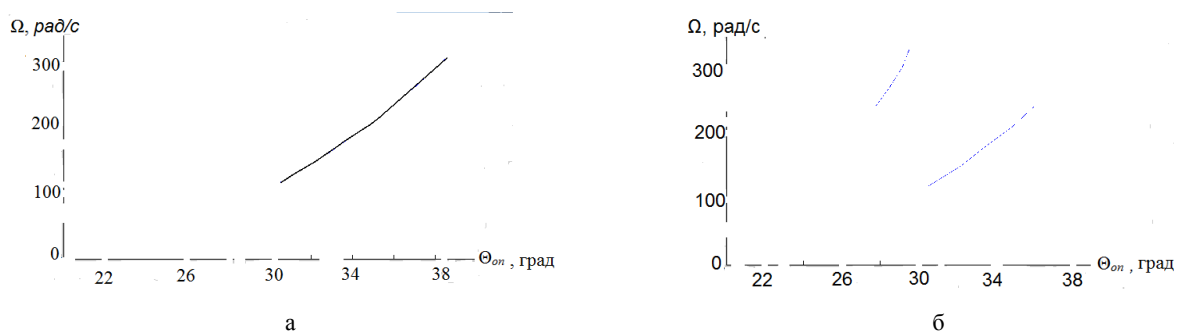


Рис. 5 – Зависимость угловой скорости от значения угла включения  $\Theta_{on}$ :  
а – при отсутствии регулирования числа витков; б – при наличии регулирования числа витков.

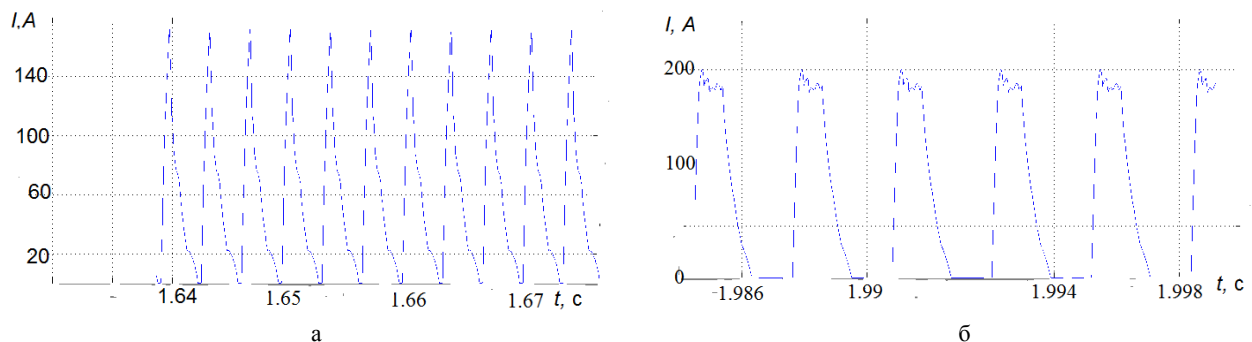


Рис. 6 – Зависимость тока фазы от времени: а – при отсутствии регулирования числа витков для угловой скорости 314.9 рад/с; б – при наличии регулирования числа витков для угловой скорости 329.1 рад/с.

**Анализ результатов.** Рис. 1 иллюстрирует изменение пульсаций момента при изменении скорости. При отсутствии регулирования числа витков при увеличении скорости пульсации момента увеличиваются, особенно резко в начале режима. Коэффициент пульсаций момента  $K_r = M_{max}/M_{ave}$  (отношение максимального момента к среднему) изменяется от 1.2 до 1.9. После переключения числа витков пульсации резко уменьшаются,  $K_r = 1.2 - 1.25$ .

Рис. 2 иллюстрирует точность поддержания средней мощности (правый край рисунка). Как следует из рис. 2,б), после переключения числа витков точность уменьшилась, что вызвано неудачным подбором углов  $\Theta_{on}$  и  $\Theta_{off}$ .

Рис. 3 иллюстрирует изменение среднего момента при изменении скорости (правый край рисунка). Очевидно, эта зависимость должна быть гиперболической. Отклонения от гиперболы после переключения числа витков вызвано неудачным подбором углов  $\Theta_{on}$  и  $\Theta_{off}$ .

Рис. 4 показывает, что максимальное значение то-

ка фазы  $I_{max}$  (правый край рисунка) при отсутствии регулирования числа витков имеет тенденцию к небольшому уменьшению от исходного значения 180 А. После переключения числа витков  $I_{max}$  резко возрастает до значения 270 А, а затем постепенно уменьшается.

Рис. 5 показывает закон изменения угла включения  $\Theta_{on}$  для обеспечения режима постоянства мощности. При отсутствии регулирования числа витков угол  $\Theta_{on}$  непрерывно возрастает до значения близкого к критическому, при котором ток не успевает уменьшиться до нуля перед следующим циклом коммутации. Это означает, что диапазон изменения скорости 3:1 является предельным. После переключения числа витков угол  $\Theta_{on}$  в начале резко уменьшается, затем растет, однако в конце диапазона остается существенно меньше критического. Это означает, что в этом режиме диапазон изменения скорости можно увеличить.

На рис. 6 представлены графики изменения тока фазы во времени в конце рассматриваемого диапазо-

на. При отсутствии регулирования числа витков форма тока резко ухудшилась, что и явилось причиной увеличения угла  $\Theta_{on}$  для обеспечения заданного момента. После переключения числа витков форма тока существенно улучшилась, что привело к существенному уменьшению пульсаций момента.

**Выводы.** Из анализа результатов следует, что режим с изменением числа витков путем переключения соединения катушек с последовательного на параллельное можно рекомендовать к применению, так как он обеспечивает уменьшение пульсаций момента и увеличение допустимого диапазона изменения скорости.

**Список литературы:** 1. А.Б. Красовский. Анализ условий формирования постоянства выходной мощности в вентильно-индукторном электроприводе // «Электричество» №2. 2002г., С. 36–45. 2. А.Б. Красовский. Выбор внутренних геометрических параметров вентильно-индукторной машины с учетом режимов работы в электроприводе // «Электричество». 2006, №6., С. 48–55. 3. Л.Ф. Коломойцев и др. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем. // Известия вузов. Электромеханика. №2. 2002г., С. 18–22. 4. Галайко Л.П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя. // Электротехника і електромеханіка. – 2005. – №1. – С. 24–26. 5. Галайко Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах // Вестник НТУ «ХПИ» 48'2005, Харьков 2005, С. 24–27. 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. Л.П. Галайко. Формирование механической характеристики вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза // Вестник НТУ «ХПИ» 44'2009, Харьков, С. 48–51. 8. Galayko L.P. Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor. ABSTRACTS. ICEEE – 2010, 13<sup>th</sup> International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. September 19 – 25, 2010, Alushta, Crimea, Ukraine, P. 96. 9. Галайко Л.П. Анализ режима торможения в имитационной модели вентильно-индукторного двигателя. Труды МКЭЭЭ-2012. 14 Международная конференция «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты». Сентябрь 23 – 29, 2012, Алушта, Крым, С. 144–146. 10. Л.П. Галайко. Имитационное моделирование режима постоянства мощности вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза // Вестник НТУ

«ХПИ» 15'2013, Харьков, С. 105–109. 11. Галайко Л.П. Анализ переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе в режиме постоянства мощности // Вестник НТУ «ХПИ» 51'2013, Харьков, С. 16–19. 12. Галайко Л.П. Анализ режима постоянства мощности в имитационной модели вентильно-индукторного двигателя. Труды МКЭЭЭ-2014. 15 Международная конференция «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и Компоненты». Сентябрь 21– 27, 2014, Алушта, Крым, С. 117–119.

**Bibliography (transliterated):**1. A.B. Krasovskij. Analiz uslovij formirovaniya postojanstva vihodnoj moshhnosti v ventil'no-induktornom elektroprivode. Elektrichestvo. No 2. 2002. 36–45. Print. 2. A.B. Krasovskij. Vibor vnutrenih geometricheskikh parametrov ventil'no-induktornoj mashini s uchetom reghimov raboti v elektroprivode. Elektrichestvo. 2006, No 6. 48–55. Print. 3. 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. 18–22. Print. 4. Galayko L.P. Imitacionoe modelirovanie ustanovivshisjsja reghimov raboti ventil'no-induktornogo dvigatelja. Elektrotehnika i Elektromehanika. 2005. No 1. 24–26. Print. 5. Galayko L.P. Imitacionoe modelirovanie ventil'no-induktornogo dvigatelja v perehodnih reghimakh. Vestnik NTU "HPI", 48'2005, Kharkiv, 2005, 24–27. Print. 6. L.P. Galayko, I.A. Golosnij. Isledovanie reghima postojanoj moshhnosti ventil'no-induktornogo dvigatelja rudnichnogo elektrovoza. Vestnik NTU "HPI", 35'2005, Kharkiv, 2005, 43–46. Print. 7. Galajko L.P. Formirovanie mehanicheskoj harakteristiki ventil'no-induktornogo dvigatelja rudnichnogo jelektrovoza. Vestnik NTU "HPI" No. 44 (2009). Kharkiv. 2009. 48–51. Print. 8. 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, 96. Print. 9. 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, 144–146. Print. 10. L.P. Galajko Imitation modeling rezhima postojanoj moshhnosti ventil'no-induktornogo dvigatelja rudnichnogo jelektrovoza". Vestnik NTU "HPI". No. 15 (2013). Kharkiv: NTU "HPI". 2013. 105–109. Print. 11. Galajko L.P. Analys perehodnih procesov v ventil'no-induktornom dvigatele v rezhime postojanoj moshhnosti. Vestnik NTU "HPI". No. 51 (2013). Kharkiv: NTU "HPI". 2013. 16–19. Print. 12. L.P. Galajko Analiz reghima posnojastva moshhnosti v imitacionoj modeli ventil'no-induktornogo dvigatelja. ABSTRACTS. ICEEE – 2014, 15<sup>th</sup> International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. September 21–27, 2014, Alushta, Crimea. 117–119. Print.

Поступила (received) 25.08.2015



**Галайко Лидия Петровна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрических машин; тел.: (050) 707-68-44; e-mail: lidagalayko@mail.ru

**Galayko Lidija Petrovna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of electrical machines, tel.: (050) 707-68-44; e-mail: lidagalayko@mail.ru