

УДК 621.313

Галайко Л. П., канд. техн. наук.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Аннотация: Проведен анализ технико-экономических показателей работы вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза в различных режимах работы и при различных способах регулирования. Расчеты проведены с помощью разработанной имитационной модели для программы Simulink пакета программ Matlab для двигателя мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 об/мин. В качестве показателей приняты коэффициент пульсаций момента, коэффициент полезного действия и максимальный ток фазы.

Ключевые слова: Вентильно-индукторный двигатель, режимы работы, пульсации момента, способы регулирования, имитационная модель, коэффициент полезного действия, магнитные потери.

Галайко Л. П., канд. техн. наук.

ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА ДЛЯ РУДНИЧНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ КЕРУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ

Анотація: Проведено аналіз техніко-економічних показників роботи вентильно-індукторного двигуна рудничного електровоза в різних режимах роботи та при різних способах керування. Розрахунки виконані за допомогою розробленої імітаційної моделі для програми Simulink пакета програм Matlab для двигуна потужністю 27 кВт та частотою обертів 1146 об/хв. В якості показників прийнято коефіцієнт пульсацій моменту, коефіцієнт корисної дії та максимальний струм фази.

Ключові слова: Вентильно-індукторний двигун, режими роботи, пульсації моменту, способи керування, імітаційна модель, коефіцієнт корисної дії, магнітні втрати.

Galayko L. P., Cand. Of Technical Science.

COMPARISON OF TECHICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF SWITCHED RELUCTANSE MOTORS FOR MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES AT VARIOUS WAYS CONTROL MODES

Abstract: The analysis of the technical and economic performance of switched reluctance motor of mine in various modes and different methods of regulation. The calculations were performed using the developed simulation model for the program Simulink Matlab software package for the engine capacity of 27 kW and a rotation speed 1146 rev/min. The indicators taken the time ripples factor, the efficiency and the maximum phase current.

Keywords: switched reluctance drive, operating mode, torque ripple, regulation methods, simulation model, the efficiency, the magnetic losses.

Введение. Одним из возможных применений вентильно-индукторных двигателей является транспорт. Для тяговых двигателей являются характерными режимы: 1) при постоянном моменте; 2) при постоянной мощности; 3) при постоянной скорости.

Особенностью вентильно-индукторных двигателей является то обстоятельство, что форма тока существенно зависит от скорости. Оптимальная форма тока для однопульсного режима возможна только для одной скорости. При изменении скорости форма тока существенно ухудшается, что приводит к существенному ухудшению характеристик режима.

Отсюда следует, что наименее проблемным является режим при постоянной скорости, куда относится отчасти режим торможения при постоянной скорости. В этом режиме возможно применение любого способа регулирования (фазное, ШИМ тока, ШИМ напряжения).

При постоянном моменте и переменной скорости (например, режим пуска) обычно используют многопульсный режим с ограничением тока.

Самым проблемным является режим постоянной мощности $P = \text{const}$ при скорости выше номинальной. Именно этому режиму уделяется значительное внимание целым рядом авторов, в том числе и автором статьи.

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. Влияние скорости на пульсации момента и другие показатели не анализируется. Для анализа используется модель для программы Simulink, разработанная на основе упрощенных магнитных характеристик. В работе [3] этот же автор предлагает метод прямого управления моментом, который обеспечивает уменьшение пульсаций момента. Однако этот метод рекомендуется только для малых и средних скоростей.

В работе [4] предложено 4 способа регулирования для обеспечения данного режима (фазовое регулирование, изменение величины питающего напряжения, изменение числа витков, использование подмагничивания). В работе приведено сравнение расчетных данных и экспериментальных. 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.

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 [5] и вторая для переходного режима [6]. Также была разработана имитационная модель для установившихся режимов, которая позволяла определить магнитные потери [7]. Модель основана на разработанной автором приближенной методике, описанной в работах [8,9]. Методика учитывает реальные законы изменения индукции на различных участках магнитопровода, однако предполагает, что поле на всех участках является однородным. Учет неоднородности значительно усложняет задачу. Приведенное в работе [10] описание уточненной методики является чисто декларативным, отсутствует доказательство необходимости ее применения.

Цель работы. С помощью разработанной имитационной модели провести анализ влияния на технико-экономические показатели режимов работы и способов регулирования этих режимов. В качестве основных технико-экономических показателей приняты: коэффициент пульсаций момента K_r (отношение среднего значения момента M_{ave} к максимальному моменту M_m) характеризует уровень вибраций, коэффициент полезного действия η характеризует энергоэффективность электропривода, максимальное значение тока фазы I_m влияет на мощность инвертора. Кроме того, анализируется изменение магнитных потерь p_m .

Описание эксперимента. В наиболее проблемном режиме постоянства мощности в исследуемом двигателе рудничного электровоза мощностью 27 кВт и номинальной угловой скоростью вращения 120 рад/с скорость должна изменяться от 120 рад/с до 360 рад/с. Рассмотрены два варианта регулирования для обеспечения этого режима работы: фазовое регулирование и регулирование с изменением числа витков путем переключения катушек фазы с последовательного соединения на параллельное. Фазовое регулирование означает изменение углов включения Θ_{on} и отключения Θ_{off} (углов между полюсами статора и ротора, при которых подается напряжение питания на катушки и отключается). Угол равен нулю, когда полюса находятся в согласованном положении. Результаты расчета представлены в таблицах 1, 2 и на рисунках 1,2,3,4. Коэффициент полезного действия определялся без учета механических и добавочных потерь.

Таблица 1 – Последовательное соединение катушек фазы, мощность равна 27000 Вт.

Ω	$\Theta_{on} / \Theta_{off}$	p_m	η	K_r	I_m
120	30/11.6	630.5	0.942	1.13	200
240	35.4/11	561.3	0.958	1.61	170
360	39.5/11	507	0.96	1.98	160

Таблица 2 – Параллельное соединение катушек фазы, мощность равна 27000 Вт.

Ω	$\Theta_{on} / \Theta_{off}$	p_m	η	K_r	I_m
120	29/12	1617	0.906	1.28	390
240	27.6/12	1215	0.942	1.16	265
360	29.5/12.6	1041	0.953	1.3	180

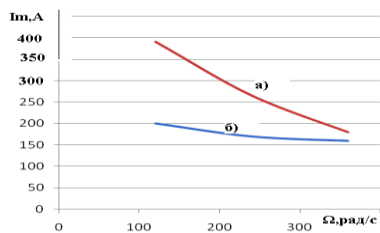


Рис.1– Зависимость максимального тока фазы I_m от угловой скорости Ω (а)- параллельное соединение катушек фазы, б)-последовательное)

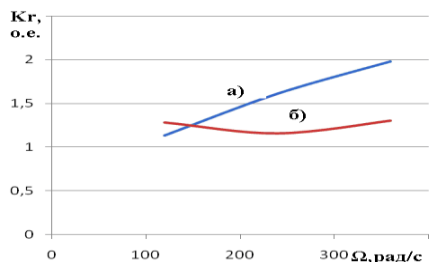


Рис.2– Зависимость коэффициента пульсаций момента K_r от угловой скорости Ω (а) последовательное соединение катушек фазы, б) параллельное)

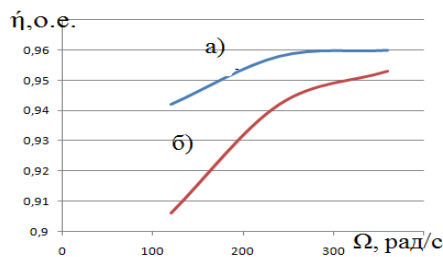


Рис.3 –Зависимость коэффициента полезного действия η от угловой скорости Ω (а) последовательное соединение катушек фазы, б) параллельное)

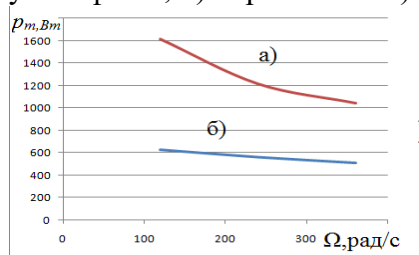


Рис.4 –Зависимость магнитных потерь P_m от угловой скорости Ω (а)- параллельное соединение катушек фазы, б)-последовательное)

В наименее проблемном режиме постоянства скорости возможно применение любого способа регулирования (фазное, ШИМ тока, ШИМ напряжения). В работе [11] приведены результаты расчетов для всех трех способов регулирования для машины

малой мощности. Расчеты показали, что различие величины показателей для разных способов регулирования невелико. Поэтому для исследуемого двигателя приводим результаты расчетов только для фазового регулирования (смотрите таблицу 3).

Таблица 3 –Угловая скорость $\Omega=120$ рад/с

P	$\Theta_{on} / \Theta_{off}$	p_m	η	K_r	I_m
28.1	30/11.6	559.5	0.945	1.13	200
15.0	28/11.6	474.6	0.94	1.2	150
11.3	27/11.6	433	0.937	1.11	120

Третий режим постоянство момента при скорости ниже номинальной. Применяем фазовое регулирование и ограничение тока ($I_{max} = 210$ А, $I_{min} = 190$ А). Результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4 –Момент $M_{ave} = 228.5$ Н.м

Ω	$\Theta_{on} / \Theta_{off}$	p_m	η	K_r	I_m
120	30/11.6	574.1	0.944	1.24	200
90	27.1/10	427.9	0.925	1.27	210
60	25/9.5	301.1	0.908	1.3	210

Анализ результатов эксперимента. В режиме постоянства мощности получены следующие результаты: при последовательном соединении катушек фазы основной недостаток высокий коэффициент пульсаций момента. При параллельном соединении катушек коэффициент пульсаций значительно уменьшается, однако при этом растут магнитные потери, уменьшается коэффициент полезного действия и значительно увеличивается максимальный ток фазы при уменьшении скорости ниже максимальной, что требует существенного увеличения мощности инвертора. Можно рекомендовать переключение катушек фазы с последовательного соединения на параллельное при скорости 240 рад/с, когда максимальный ток увеличился еще незначительно

В режиме постоянства скорости (см. табл.3) главное достоинство практическое постоянство малого значения коэффициента пульсаций момента.

В режиме постоянства момента (см. табл.4) при уменьшении скорости при постоянном моменте уменьшаются мощность и коэффициент полезного действия. Результаты расчета этого режима могут быть использованы при разработке программы для

контроллера для регулирования процесса пуска (см. [12], где рассматривается моделирование процесса пуска в программе Simulink).

Выводы. В работе [13] отмечается (далее цитата): «не уделив должного внимания предварительному математическому моделированию желаемых режимов работы, оптимизации конструкции и законов управления ВИП, пользователь получит негативный опыт в попытке применения новой техники». Исследования с помощью разработанных моделей могут быть использованы при проектировании вентильно-индукторных двигателей рудничных электровозов и их системы управления для различных режимов работы.

Список использованной литературы.

1. Красовский А.Б. Анализ условий формирования постоянства выходной мощности в вентильно-индукторном электроприводе. [Текст] / А.Б.Красовский // *Электричество*. – 2002. – №2. – С. 36–45.

2. Красовский А.Б. Выбор внутренних геометрических параметров вентильно-индукторной машины с учетом режимов работы в электроприводе. [Текст] / А.Б.Красовский // *Электричество*. – 2006. – №6. – С. 48–55.

3. Красовский А.Б. Прямое управление моментом вентильно-индукторного двигателя. [Текст] / А.Б.Красовский, С.А. Кузнецов // *Электричество*. – 2012. – №12. – С. 36–45.

4. Коломойцев Л.Ф. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем. [Текст] / Л.Ф. Коломойцев, И.А. Прокопец, С.А.Пахомин и др. // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2002. – №2. – С. 18 – 22.

5. Галайко Л.П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя. [Текст] / Л.П.Галайко. // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2005. – №1. – С. 24-26.

6. Галайко Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах. [Текст] / Л.П.Галайко // *Вестник НТУ «ХПИ»* 48'2005. – Харьков. – 2005. – С. 24-27.

7. Галайко Л.П. Имитационная модель установившегося режима работы вентильно-

индукторного двигателя с учетом магнитных потерь. [Текст] / Л.П.Галайко // *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. №3/2009 (56) часть 2. – Кременчук – 2009. – С. 131-134.

8. Галайко Л.П. Учет магнитных потерь при проектировании вентильных индукторных двигателей. [Текст] / Л.П.Галайко // *«Електротехніка і Електромеханіка»* – 2003. №2. С. 17-18.

9. Галайко Л.П. Математическая модель вентильно-индукторного двигателя с учетом магнитных потерь. [Текст] / Л.П.Галайко // *Вестник НТУ «ХПИ»* 9'2003, т.3. – Харьков– 2003, –С. 57-60.

10. Кузнецов В.А. Инженерная методика проектирования индукторной машины для вентильно-индукторного двигателя. [Текст] / В.А.Кузнецов. В.А Кузьмичев // *«Электричество»*. – 2007. – №10. – С. 24–33.

11. Галайко Л.П. Формирование механической характеристики вентильно-индукторного двигателя для стиральной машины малой мощности. [Текст] / Л.П.Галайко // *Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах»*. – Севастополь. – 2007.. – С. 36-38.

12. Галайко Л.П. Анализ процесса пуска в имитационной модели вентильно-индукторного двигателя. [Текст] / Л.П.Галайко // *Вісник НТУ «ХПИ»* 38'2014. – Харків. –2014.. –С. 63-68.

13. Бычков М.Г. Вентильно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития. [Текст] / М.Г Бычков // *Рынок электротехники*.. – 2007.. – №4.. – С 71 -78.

Получено 1.05.2016.

References

1. Krasovskiy A.B. Analiz usloviy formirovaniya postoyanstva vykhodnoy moshchnosti v ventil'no-induktornom elektroprivode. [Analysis of the conditions of formation of the output of constancy in the Switched Reluctance Drive], (2002), // *“Elektrichestvo”*, №2., pp. 36–45. (In Russian).

2. Krasovskiy A.B. Vybor vnutrennikh geometricheskikh parametrov ventil'no-induktornoy mashiny s uchetom rezhimov raboti v elektroprivode. [The choice of geometric parameters of the Switched Reluctance Motor-based on operating modes in the drive] (2006) // *“Elektrichestvo”*, №6. pp. 48–55. (In Russian).

3. Krasovskiy A.B., Kuznetsov C.A. Pryamoe upravlenie momentom. [Direct torque control of the Switched Reluctance Motor], (2012), // *Elektrichestvo*, №12. pp. 36–45. (In Russian).

4 Kolomoitsev L.F., Prokopets I.A., Pakhomin S.A. etc. Rezhimy raboty tyagovogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza s trekhfaznim reaktivnim indukturnim dvigatelem. [Operation modes of a railway drive of a mine electric locomotive with a three-phase reluctance induction motor]. (2002.), // *“Izvestiya vuzov. Elektromekhanika”*, No. 2., pp. 18–22. (In Russian).

5. Galayko L.P. Imitatsionnoe modelirovanie ustanovivshikhsya rezhimov raboti ventil'no-induktornogo dvigatelya. [Simulation modeling of steady state Switched Reluctance motor], (2005) // *“Elektrotehnika i I Elektromekhanika”*, – 2005. – №1. – pp. 24–26. (In Russian) .

6. Galayko L.P. Imitatsionnoje modelirovanije ventil'no-induktornogo dvigatelja v perehodnikh rezhimakh. [Simulation of Switched Reluctance motor in transient conditions]. (2005), // *Vestnik NTU “HPI”*, 48'2005, Kharkiv., pp. 24–27. (In Russian).

7. Galayko L.P. Imitacionnaya model ustanovivshegosya rezhima raboti ventil'no-induktornogo dvigatelya s uchetom magnitnikh poter [The simulation model of steady state operation of the Switched Reluctance motor based magnetic losses] (2009), / *“Visnik KDPU imeni Mihaila Ostrogradskogo. №3/2009 (56) chast 2, Kremenchug* –pp. 131-134. (In Russian).

8. Galayko L. P. Uchet magnitnikh poter' pri proektirovanii ventil'no-induktornikh dvigatelyey. [Accounting for the magnetic losses in the Switched Reluctance Motor], (2003, // *Elektrotehnika I Elektromekhanika* –. №2. pp. 17-18. (In Russian).

9. Galayko L.P. Matematicheskaya model ventil'no-induktornogo dvigatelya s uchetom magnitnikh poter' [Mathematical model Switched Reluctance Motor based on magnetic losses], (2003.) // *Vestnik NTU “HPI”*, 9'2003.,Tom.3, Kharkiv, pp.57–60. (In Russian).

10. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. Inzhenernaya metodika proektirovaniya indukturnoy mashini dlya ventil'no-induktornogo dvigatelya [Engineering design methods inductor machines for Switched Reluctance Motor],(2007)// *“Elektrichestvo”*, №10. pp. 24–33. (In Russian).

11. Galayko L.P. Formirovanie mehanicheskoy karakteristiki ventil'no-induktornogo dvigatelya dlya stiralnoy mashini maloy moshchnosti.[Formation of the mechanical characteristics of the Switched Reluctance motor for low power washer], (2007), *Materiali Mezhdunarodnyj nauchno-tekhnicheskiy konferentsii “Problemi povishenija energoefektivnosti elektromekhanicheskikh preobrazovateley v elektroenergeticheskikh sistemakh”*,.Sevastopol., pp. 36-38,. (In Russian).

12. Galayko L.P. Analiz protsesa puska v imitacionnoy modeli ventil'no-induktornogo dvigatelya. [Analysis of the starting process in the simulation model Switched Reluctance motor], (2014) // *Visnik NTU “HPI”* 38'2014, Kharkiv, pp.63-68. (In Russian).

13. Bichkov M.G. Ventilno-induktorniy elektroprivod: sovremennoe sostoyanie i perspektivi razvitiya.:[Switched Reluctance Drive the current state and prospects of development],. (2007) // *Rinok elektrotehniki. №4. pp.71-78. (In Russian).*



Галайко Лидия Петровна, кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры электрических машин НТУ «ХПИ». Тел.(057)707-68-44. e-mail:lidagalayko@gmail.com