

Исследование многополюсного асинхронного тягового частотно-регулируемого двигателя.

05, май 2014

DOI: 10.7463/0514.0709521

профессор, д.т.н. Беспалов В. Я.¹, профессор, д.т.н. Красовский А. Б.², доцент к.т.н. Панихин М. В.¹, доцент к.т.н. Фисенко В. Г.¹

УДК 621. 313. 323

¹Россия, МЭИ

²МГТУ им. Баумана

bespalovvy@rambler.ru

krasovsky@bmstu.ru

misha3333@rambler.ru

isenkovg@rambler.ru

Введение и постановка задачи

Повышение цен на энергоносители, забота об экологии и повышение надёжности механизма – основные причины, по которым абсолютное большинство мировых производителей транспортных средств уже длительное время ведут разработки гибридного привода, а также привода, основанного исключительно на электрической тяге. Использование силовой и коммутирующей электроники значительно повысило возможность массового внедрения тяговых электроприводов с разными типами электрических машин в транспортных средствах.

Асинхронные электрические двигатели относятся к наиболее распространённому, в том числе, и в транспортных системах, типу электрических машин [1,2,3]. Одним из наиболее сложных и ответственных этапов при их проектировании является выбор числа полюсов. На этот выбор влияет большое число противоречивых факторов: номинальная частота вращения, необходимый диапазон регулирования, длительность работы при максимальной частоте вращения, система охлаждения, габариты, компоновка, удельные показатели и многие другие. Увеличение числа полюсов позволяет, как правило, существенно уменьшить массу двигателя из-за уменьшения потока на полюсном делении, но при этом пропорционально увеличивается частота тока и перемагничивания стали, что приводит к заметному увеличению как основных, так и добавочных потерь, и, следовательно, к пони-

жению КПД. Поэтому к выбору числа полюсов надо подходить особенно тщательно, учитывая индивидуальные требования к каждому конкретному двигателю и условиям его применения.

Рекомендации по выбору числа полюсов для двигателей общепромышленного применения основаны на многолетней практике их проектирования и с той или иной полнотой имеются в обширной отечественной и зарубежной литературе на эту тему, например, в [4-7]. С учетом этих рекомендаций, многополюсные двигатели, в частности, с числом полюсов более 12 в промышленных электроприводах встречаются относительно редко. Однако для тяговых электроприводов с целью удовлетворения повышенным требованиям к минимизации их массогабаритных показателей разработчики часто отходят от общепринятых рекомендаций и применяют двигатели с повышенным числом полюсов без всесторонней оценки такого решения.

Данная статья посвящена исследованию динамических и энергетических характеристик многополюсного тягового асинхронного двигателя (ТАД), спроектированного и изготовленного для применения в индивидуальном электроприводе большегрузных колесных машин.

Исходные данные анализируемого ТАД с короткозамкнутым ротором: мощность на валу $P_n = 60$ кВт; число полюсов $2p=30$, частота тока в обмотке статора $f_n = 500$ Гц при номинальной частоте вращения $n_n = 2000$ мин⁻¹. При максимальной частоте вращения $n_{max} = 5000$ мин⁻¹ частота тока в обмотках статора $f_{max} = 1250$ Гц; высота элементарного проводника обмотки статора 3,55 мм.

Как известно, наиболее высокие технико-экономические показатели тягового электропривода обеспечиваются при векторном управлении [8,9,10]. В анализируемом варианте электропривода для реализации такого управления использован трехфазный автономный инвертор напряжения, выполненный по мостовой схеме. Силовое напряжение питания подается на него от неуправляемого трехфазного выпрямителя, выполненного по мостовой схеме Ларионова [11].

Удобным средством для исследования поведения привода с рассматриваемым двигателем является имитационное моделирование. Для того чтобы достоверно отразить в модели реальные процессы в приводе целесообразно её построить так, чтобы структура модели была максимально приближена к структуре реального устройства с имитацией логики его работы с использованием моделей реальных силовых электронных компонентов.

Описание модели и методики моделирования

Имитационная модель ТАД с системой векторного управления, реализованная в математическом пакете MATLAB с приложениями SIMULINK и SIMPOWER SYSTEMS показана на рисунке 1. Она повторяет структуру реального электропривода и состоит из следующих функциональных блоков [12]:

- Блок ИМ – маскированная подсистема, построенная на основании уравнений асинхронного двигателя в d - q координатах для моделирования процессов в

ТАД [10]. При двойном щелчке по пиктограмме этого блока открывается окно настройки его параметров.

- Блок IGBT Invertor – маскированная подсистема, моделирующая работу автономного инвертора. При двойном щелчке по пиктограмме этого блока также открывается окно настройки его параметров.

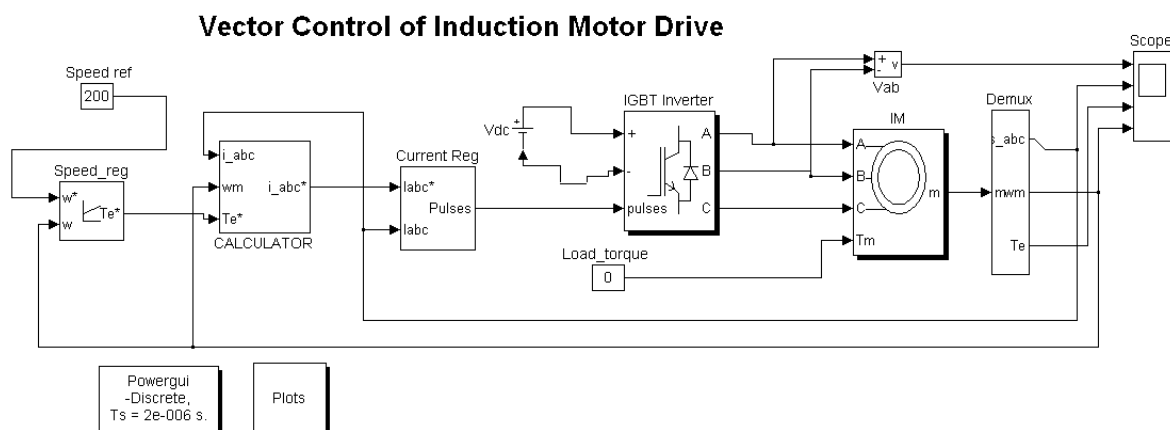


Рисунок 1 – Имитационная модель асинхронного ТАД с векторным управлением

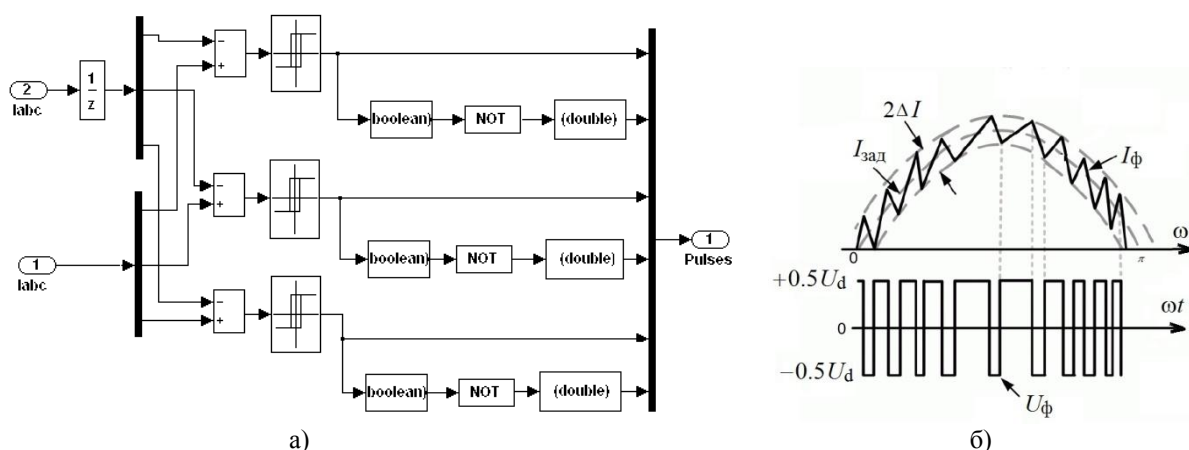


Рисунок 2 – Принцип построения и работы регулятора тока в модели

- Блок Current Reg – подсистема, имитирующая работу регулятора тока. Принцип его построения показан на рисунке 2,а. Он содержит 3 релейных элемента с гистерезисом (с зоной нечувствительности), на входах которых сравниваются заданные и фактические значения фазного тока I_ϕ ТАД. В функции выходных сигналов этих элементов формируются сигналы для управления транзисторами инвертора напряжения. Принцип формирования фазного тока I_ϕ синусоидальной формы в одной из фаз двигателя показан на рисунке 2,б. Как видно, ток I_ϕ колеблется с амплитудой $2\Delta I$, задаваемой зоной нечувствительности релейного элемента ΔI , относительно заданного значения $I_{\text{зад}}$.
- Блок Calculator – подсистема, осуществляющая по заданному алгоритму преобразование сигналов фазных токов i_a , i_b , i_c , снимаемых с фазных обмоток

двигателя и представленных в естественных фазных координатах $1a, 1b, 1c$ в сигналы i_d, i_q относительно осей d, q и наоборот. Здесь же по сигналам фазных токов и напряжений рассчитывается потокосцепление ротора и его текущее положение. Принцип построения этого блока показан на рисунке 3.

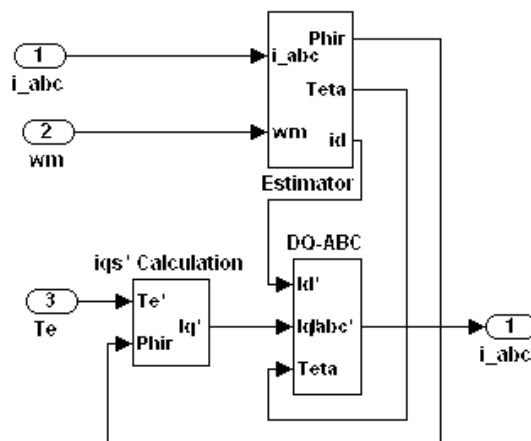


Рисунок 3 – Принцип построения блока Calculator

- блок Speed_reg – подсистема, имитирующая работу регулятора скорости. Его вид показан на рисунке 4.
- Блок Demux – вспомогательный блок для обработки сигналов

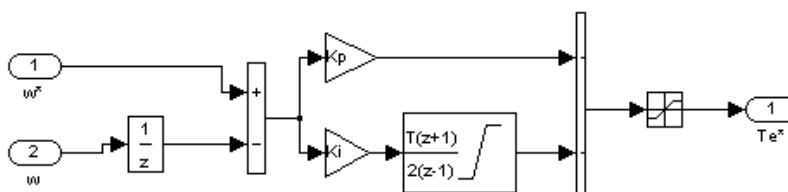


Рисунок 4 – Принцип построения регулятора скорости.

Перед проведением моделирования в открывающиеся окна настройки параметров блоков вводятся значения параметров моделируемой системы, в том числе, уровень ограничения выходного сигнала регулятора скорости, определяющего значение ограничения момента двигателя в области относительно малых скоростей ТАД. Учитывая тот факт, что модель содержит непрерывные и дискретные элементы, моделирование целесообразно вести с фиксированным шагом.

На рисунке 5,а показана динамическая механическая характеристика ТАД, полученная в результате моделирования пуска двигателя до скорости 230 1/с вхолостую при ограничении момента двигателя на уровне 1200 Нм. Как видно, характеристика имеет два характерных участка: первый участок с практически неизменным средним значением момента в области скоростей от 0 и примерно до 100 1/с и второй участок с уменьшающимся моментом по мере дальнейшего роста скорости.

В окрестности заданного максимального значения скорости наблюдается колебательный процесс, при котором момент двигателя изменяет знак, т.е. становится тормозящим (двигатель переходит в генераторный режим). Временные диаграммы на рисунке 5,б иллюстрируют изменение момента и скорости двигателя при работе двигателя на этой характеристике в различных её участках.

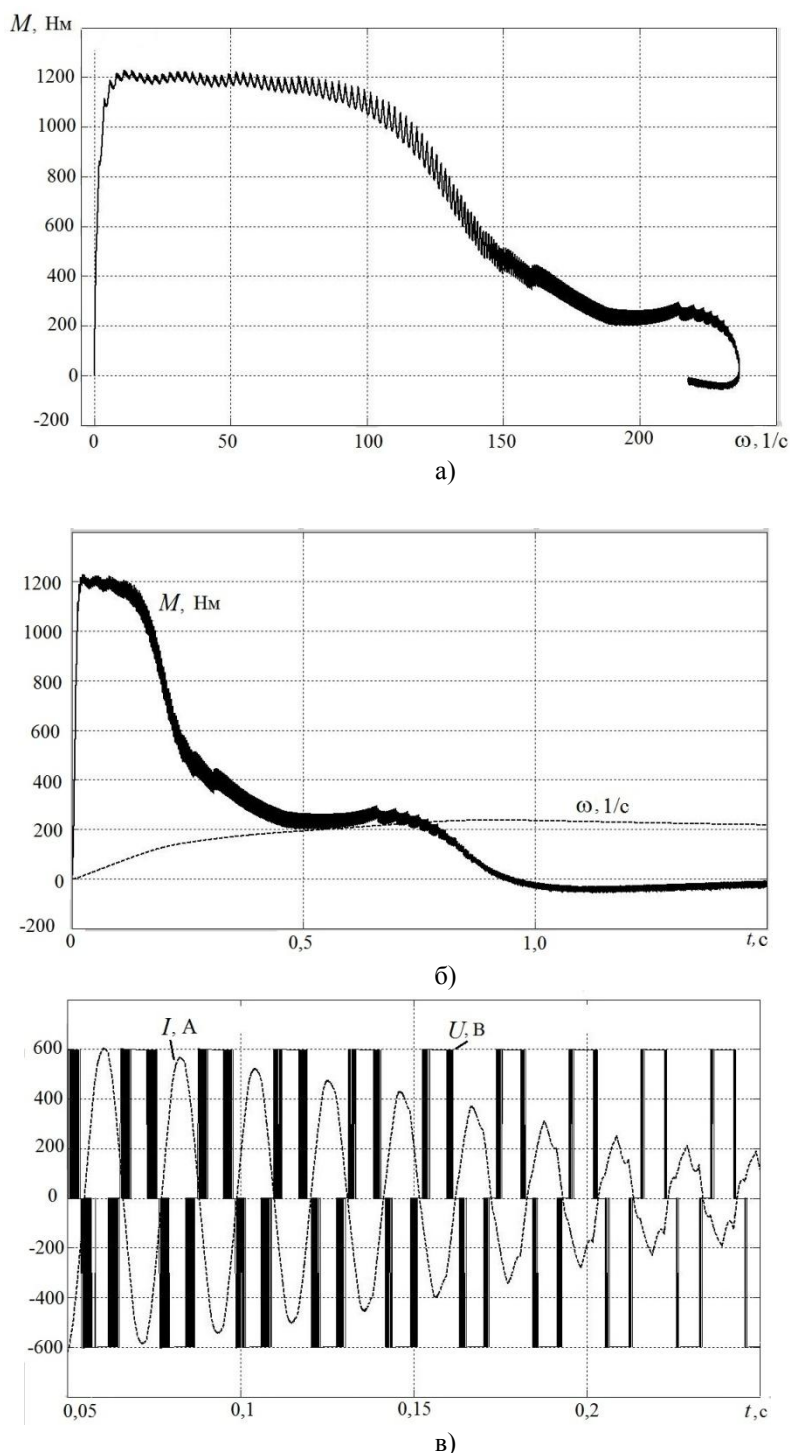


Рисунок 5 – Результаты моделирования работы ТАД.

Для объяснения такого вида полученных характеристик на рисунке 5,в показаны кривые, отражающие изменение мгновенных значений фазных тока и напряжения. Видно,

что в области практически постоянного момента форма среднего значения фазного тока близка к синусоидальной. Это обеспечивается соответствующей импульсной модуляцией фазного напряжения.

Снижение среднего момента двигателя, как видно, объясняется искажением формы фазного тока в области высоких скоростей из-за неспособности источника силового питания компенсировать возрастающую по мере роста скорости ЭДС движения. При этом модуляция напряжения на фазах двигателя прекращается, т.е. к ним прикладывается полное напряжение силового источника питания.

Оценка добавочных потерь в многополюсном ТАД

При высоких частотах токов возникает вопрос о добавочных потерях в ТАД. В связи с этим был выполнен расчет электромагнитного поля в пазу статора ТАД.

Глубина проникновения поля в медный проводник обмотки статора при номинальной частоте

$$h_{\xi 500} = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu_0 g_{Cu115} f_n}} = 3,515 \text{ мм}$$

а при максимальной частоте $h_{\xi 1250} = 2,2$ мм. Здесь μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; g_{Cu115} – удельная электропроводность меди при температуре 115°C , соответствующей допустимой температуре нагрева изоляции класса E .

Как видим, при номинальной частоте тока глубина проникновения равна высоте проводника, а при максимальной – глубина проникновения существенно меньше её. Следовательно, в проводниках обмотки статора имеет место ощутимое проявление скин-эффекта.

Для его количественной оценки были выполнены численные расчеты электромагнитного поля в пазу статора. Результаты этих расчетов представлены на рисунке 6.

Установлено, что коэффициент k_ϕ увеличения электрических потерь в обмотке статора при номинальной частоте $k_{\phi 500} = 1,21$, а при максимальной $k_{\phi 1250} = 2,15$. Такое увеличение потерь для номинальной частоты находится в пределах допустимого, а для максимальной – чрезмерным. Это накладывает более жесткие требования на систему охлаждения и класс изоляции обмоток.

В обмотке ротора вследствие низкой частоты тока в рабочих режимах добавочными электрическими потерями можно пренебречь. Тем не менее, для снижения частоты тока в обмотке статора (повышения КПД двигателя) представляется целесообразным примерно вдвое уменьшить число полюсов двигателя.

Кроме того, были проведены расчеты ослабления потока из-за демпфирующего действия вихревых токов в шихтованной стали статора при повышенных частотах для толщины листа 0,28 мм. Расчеты показали, что при $f_n = 500$ Гц ослабление потока в шихтованной стали составляет 0,42 %, а при $f_{\max} = 1250$ Гц – 2,5 %. Отметим, что для листов стали толщиной 0,5 мм при частоте 50 Гц ослабление потока составляет 0,043 %.

По имеющимся данным был выполнен поверочный расчет ТАД как на основе численных полевых расчетов [3], так и с помощью классических методик [13], использующих теорию цепей.

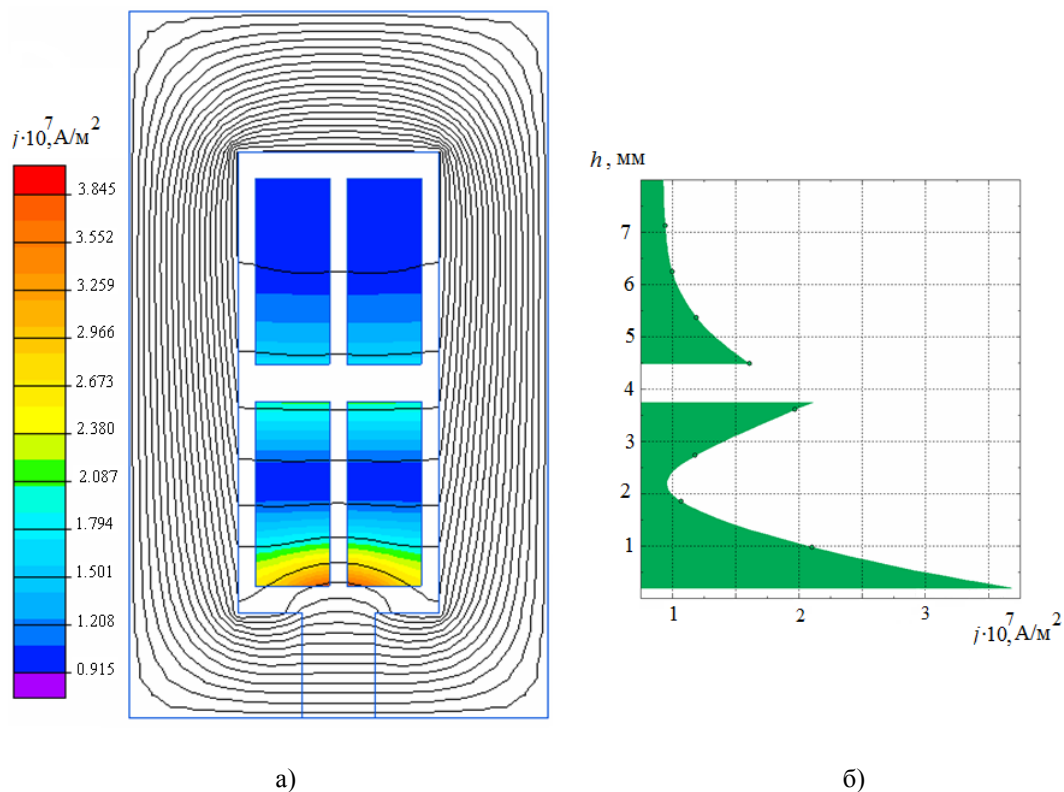


Рисунок 6. Картина поля в пазу статора ТАД мощностью 60 кВт (а) и эпюра распределения плотности тока j по высоте паза h при частоте 1250 Гц (б).

Фрагмент картины поля в поперечном сечении ТАД в номинальном режиме (по опытными данным $I_n = 146 \text{ A}$, $f_n = 500 \text{ Гц}$, скольжение $s_n = 5,8 \%$, $M_n = 310 \text{ Нм}$, $P_n = 60 \text{ кВт}$) приведен на рисунке 7.

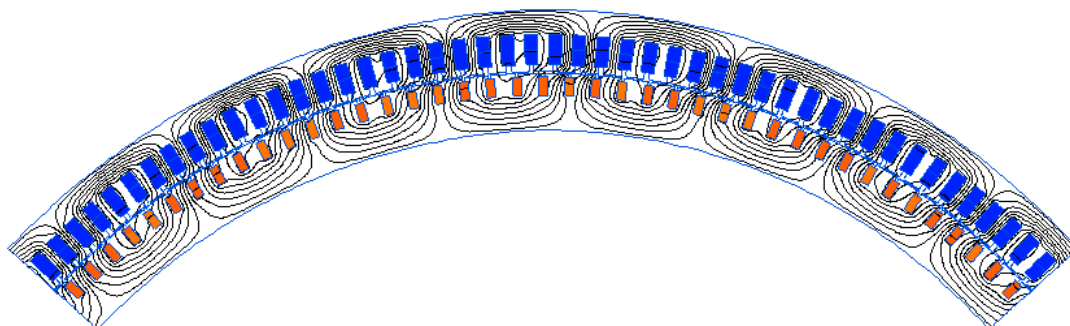


Рисунок 7. Картина поля в поперечном сечении ТАД мощностью 60 кВт для номинального режима

Расчеты поля ТАД показали, что электромагнитный момент M составляет 330 Нм. Следовательно, момент на валу будет достаточно близок к заданному (после вычитания механических и электрических потерь в роторе).

В качестве примера на рисунке 8 показаны зависимости момента M от скольжения s , полученные из численных полевых расчетов (кривая 1) и с помощью классических аналитических методик (кривая 2), при линейном напряжении между фазными обмотками двигателя $U_{\text{л}}=324\text{В}$.

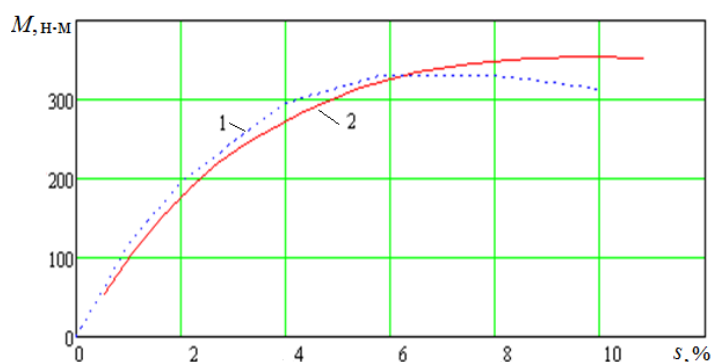
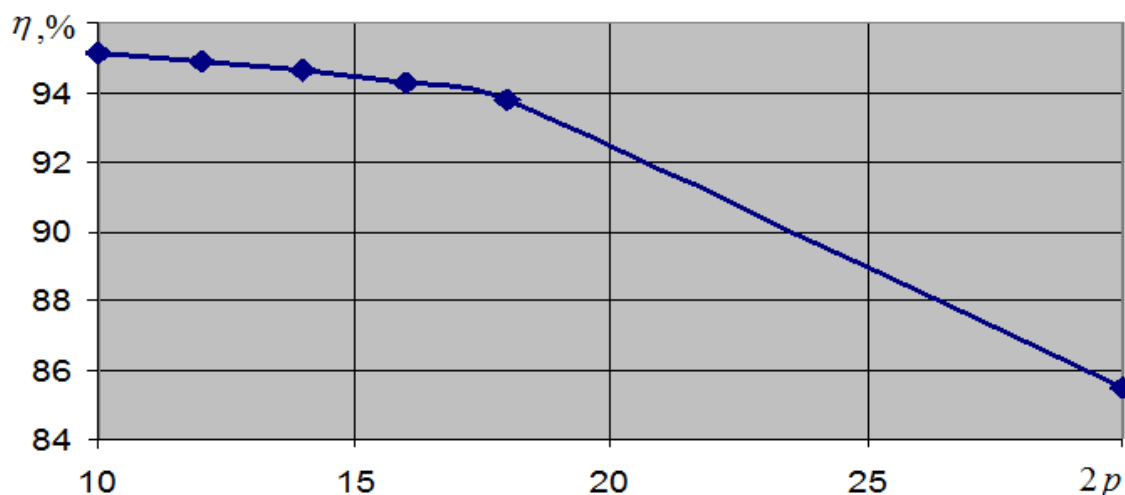


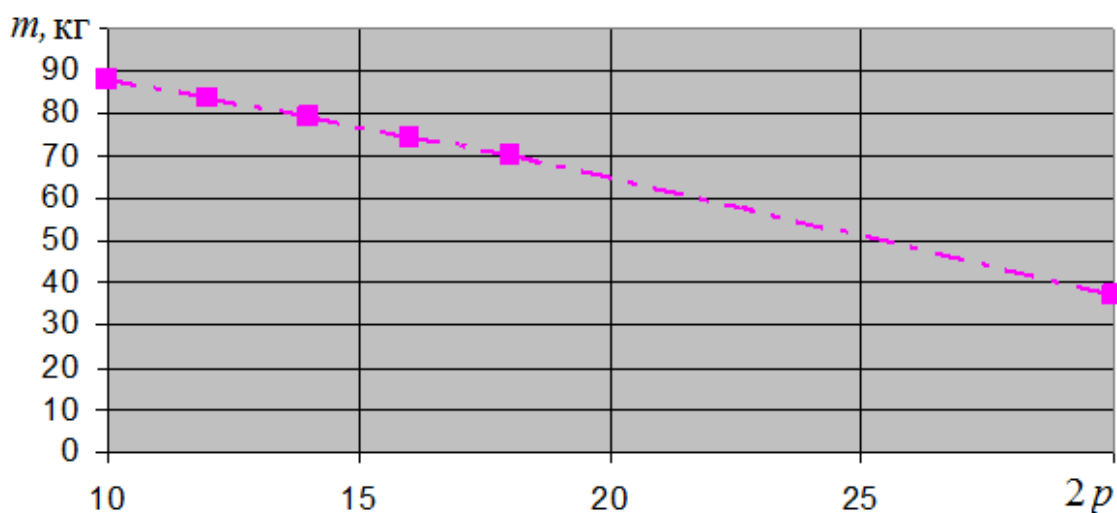
Рисунок 8 – Механические характеристики ТАД мощностью 60 кВт при $2p=30$ и $f_n=500$ Гц.

По результатам выполненных расчетов электромагнитного поля были определены электрические и магнитные потери в двигателе, согласно которым КПД в номинальном режиме $\eta = 86,5 \%$ (против заявленного изготовителем опытного значения 87%). Заметим, что КПД общепромышленного асинхронного двигателя серии 4А такой же мощности и частоты вращения составляет около 92% .

Дальнейший анализ влияния числа пар полюсов на показатели ТАД при сохранении заданных габаритов показал, что наиболее эффективным двигатель будет примерно при $2p=18$. На рисунках 9,а и 9,б приведены зависимости КПД η и массы активных материалов m от числа полюсов $2p$ ТАД, соответственно. Как видим, такое уменьшение числа полюсов привело к значительному увеличению КПД, но при этом масса двигателя возросла почти в 2 раза. Тем не менее, этот вариант, как показали расчеты, наилучшим образом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тяговой механической характеристике.



а)



б)

Рисунок 9 - Зависимость КПД и массы активных материалов ТАД от числа полюсов

Выводы

Показано, что многополюсные ТАД по совокупности показателей могут обладать далеко не оптимальными динамическими и энергетическими характеристиками. В результате моделирования установлено, что в области высоких скоростей имеет место снижение развиваемого ими момента, что объясняется искажением формы фазного тока из-за неспособности источника силового питания компенсировать возрастающую по мере роста скорости ЭДС движения.

Вследствие высокой частоты питания в ТАД возникают завышенные добавочные электрические и магнитные потери, для снижения которых необходимо уменьшить число полюсов и соответственно номинальную частоту напряжения питания. Дополнительные расчеты и исследования анализируемой в статье конструкции многополюсного двигателя показали, что для получения требуемой тяговой характеристики наиболее приемлемым является число полюсов $2p=18$.

Таким образом, выбор числа полюсов при проектировании ТАД следует выполнять наиболее тщательно, учитывая полный набор требований, предъявляемых к двигателю. Особое внимание при этом следует обращать на величину добавочных потерь, существенно влияющих на потери и КПД.

Список литературы

1. Златин П.А., Кеменов В.А., Ксенович И.П. Электромобили и гибридные автомобили. М.: Агроконсалт, 2004. 416 с.
2. Флоренцев С., Изосимов Д. Тяговый электропривод в гибридных транспортных средствах. Часть 1. Идеология проектирования КТЭО // Электронные компоненты. 2009. № 11. С. 13-18.
3. Флоренцев С., Изосимов Д. Тяговый электропривод в гибридных транспортных средствах. Часть 2. Идеология проектирования КТЭО // Электронные компоненты. 2009. № 12. С. 65-73.
4. Проектирование электрических машин: учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылов а. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высшая школа, 2002 . 757 с.
5. Гольдберг О.Д., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2006. 430 с.
6. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1982. 272 с.
7. Boldea I., Nasar S.A. The Induction Machines Design Handbook. 2nd ed. CRC Press, 2009. 845 p.
8. Quang N.P., Dittrich J.-A. Vector Control of Three-Phase AC Machines. Springer Berlin Heidelberg, 2008. DOI: [10.1007/978-3-540-79029-7](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79029-7)
9. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. Induction Motor Control Design. Springer London, 2010. 351 p. DOI: [10.1007/978-1-84996-284-1](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-284-1)
10. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.
11. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. М.: МЭИ, 2009. 632 с.
12. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
13. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах / А.В. Иванов-Смоленский, Ю.В. Абрамкин, А.И. Власов, В.А. Кузнецов; Под ред. А.В. Иванова-Смоленского. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216 с.

Research of the multipolar induction traction frequency regulated motor

05, May 2014

DOI: 10.7463/0514.0709521

V. Ia. Bepalov, A.B. Krasovskii, M. V. Panihin, V. G. Fisenko

¹Moscow Power Engineering Institute, 111250, Moscow, Russian Federation²Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federationbespalovvy@rambler.rukrasovskv@bmstu.rumisha3333@rambler.ruisenkovg@rambler.ru

The paper considers the application features of traction induction electric motors in transmissions of vehicles. It shows that one of important stages in their designing is to choose the number of poles. In traction electric drives engines with the raised number of poles without comprehensive assessment of such solution are often applied. The paper investigates dynamic and power characteristics of the multi-polar traction asynchronous engine (TAE) designed and made for using in the individual electric drive of heavy-load wheeled cars. The basic functional elements of the model to simulate the electric drive in Matlab environment with the Simulink and SimPower Systems applications in the structure with vector control are described, and the simulation modeling results of its dynamic mechanical characteristics are provided. It is established that because of increased alternating frequency of currents of the multi-polar engine in the range of high speeds there is an excessive decrease in the torque and the requirement for constancy of the target capacity, corresponding to the specified traction characteristic is not fulfilled. It is a consequence of the waveform distortion of engine phase current in the range of high speeds because of incapability of the power source to compensate an increasing EMF of movement as the speed continues to grow.

The paper studies the influence of increased current frequencies on the additional losses in the engine. The analysis of electromagnetic field penetration depth in the copper conductor of stator winding at high frequency allowed us to establish a significant skin – effect. The quantitative assessment is given to this phenomenon by results of numerical calculation of electromagnetic field distribution in a stator groove. Significant increase in additional losses in the engine is established, and estimates of flow loss extent because of damping actions of eddy currents in the

laminated steel of stator at increased frequencies are given. The alternative option of the traction asynchronous engine with the improved characteristics is proved. The attained results can be used to design the traction electric drives of vehicles based on the asynchronous engines.

Publications with keywords: [simulation modeling](#), [traction electric drive](#), [multipolar induction motor](#), [traction characteristic](#), [skin-effect](#), [factor of increase in additional losses](#)
Publications with words: [simulation modeling](#), [traction electric drive](#), [multipolar induction motor](#), [traction characteristic](#), [skin-effect](#), [factor of increase in additional losses](#)

References

1. Zlatin P.A., Kemenov V.A., Ksenevich I.P. *Elektromobili i gibridnye avtomobili* [Electric and hybrid cars]. Moscow, Agrokonsalt Publ., 2004. 416 p. (in Russian).
2. Florentsev S., Izosimov D. [Traction Motor in Hybrid Vehicles. Part 1. Designing Drive Engineering Package]. *Elektronnyye komponenty - Electronic Components*, 2009, no. 11, pp. 13-18. (in Russian).
3. Florentsev S., Izosimov D. [Traction Motor in Hybrid Vehicles. Designing Traction Electric Equipment Set. Part 2]. *Elektronnyye komponenty - Electronic Components*, 2009, no. 12, pp. 65-73. (in Russian).
4. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric machines design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2002. 757 p. (in Russian).
5. Gol'dberg O.D., Sviridenko I.S. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric machines design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2006. 430 p. (in Russian).
6. Balagurov V. A. *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Design of special electrical AC machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p. (in Russian).
7. Boldea I., Nasar S.A. *The Induction Machines Design Handbook*. 2nd ed. CRC Press, 2009. 845 p.
8. Quang N.P., Dittrich J.-A. *Vector Control of Three-Phase AC Machines*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. DOI: [10.1007/978-3-540-79029-7](https://doi.org/10.1007/978-3-540-79029-7)
9. Marino R., Tomei P., Verrelli C.M. *Induction Motor Control Design*. Springer London, 2010. 351 p. DOI: [10.1007/978-1-84996-284-1](https://doi.org/10.1007/978-1-84996-284-1)
10. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998. 704 p. (in Russian).

11. Rozanov Yu.K., Ryabchitskiy M.V., Kvasnyuk A.A. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, MEI Publ., 2009. 632 p. (in Russian).
12. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK* [Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems with PC]. St. Petersburg, KORONA-Vek Publ., 2008. 368 p. (in Russian).
13. Ivanov-Smolenskiy A.V., Abramkin Yu.V., Vlasov A.I., Kuznetsov V.A. *Universal'nyy metod rascheta elektromagnitnykh protsessov v elektricheskikh mashinakh* [Universal method for calculating electromagnetic processes in electrical machines]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 216 p. (in Russian).