

В.С. Петрушин, д-р техн. наук,
Бухалфа Бендахман, А.М. Якимец, кандидаты техн. наук,
О.В. Каленик

КОРРЕКТИРОВКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

Експериментально підтверджено результати математичного моделювання, в процесі якого визначаються енергетичні показники (ККД та коефіцієнт потужності) регульованого асинхронного двигуна в неусталених режимах при різних законах частотного регулювання.

Экспериментально подтверждены результаты математического моделирования, в процессе которого определяются энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности) регулируемого асинхронного двигателя в неустановившихся режимах при различных законах частотного регулирования.

The mathematic modeling result's of adjustable-speed induction motor in transient modes for defining of power indexes (efficiency and power factor) with different laws of frequency control is corroborate by experiment.

Основными критериями оценки эффективности работы асинхронных двигателей (АД) в системах регулируемых электроприводов (РЭП) являются энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности). Они могут быть использованы в качестве целевых функций при оптимизационном проектировании регулируемых асинхронных двигателей (РАД), адаптированных к специфическим условиям эксплуатации, например в наиболее распространенных частотных электроприводах. Вопросам исследований энергетических показателей РАД в статических режимах посвящен ряд работ [1-3].

В [4] проведен анализ энергетических показателей в статических режимах при разных законах регулирования частотных преобразователей, а в [5-6] при разных типах преобразователей.

Наиболее характерны для РАД перемежающиеся режимы, в которых наблюдается последовательная смена периодов работы с неизменной нагрузкой на одной частоте вращения с периодами работы на другой частоте вращения с иной, но также неизменной нагрузкой, соответствующей этой частоте. Поэтому важным является анализ энергетических показателей при динамических режимах. В [7] выполнено их исследование с

помощью компьютерного моделирования в среде MATLAB 7. Вместе с тем при таком моделировании не учитываются явления насыщения, стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора, влияющие на значения параметров схемы замещения АД. Особенно существенно влияние этих явлений в АД регулируемых электроприводов, работающих в широких диапазонах изменения частоты вращения. Кроме того, адекватность определения энергетических показателей во многом связана с учетом всех составляющих потерь в АД, к числу которых относятся потери в стали, механические и добавочные [8-9].

Потери в стали могут составлять более 20 % полных потерь в номинальном режиме и более 50 % полных потерь х.х. Неучет этих потерь при анализе энергетических характеристик приводит к существенным погрешностям [10]. Значительно увеличиваются потери в стали при повышенных частотах питания двигателя. Энергетика динамических режимов в значительной степени зависит от законов частотного регулирования при скалярном и векторном способах управления [11].

На кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета разработана модификация программного продукта DIMASDrive [12], позволяющая проводить расчеты энергетиче-

ских показателей РАД в динамических режимах, в том числе и в условиях несинусоидального питания.

Эффекты насыщения магнитной системы основным магнитным потоком и потоками рассеяния, вытеснения тока в роторе учитываются зависимостями параметров схемы замещения АД, полученными в установившихся режимах работы. При моделировании динамических режимов используются недостающие составляющие потерь мощности (потери в стали, механические и добавочные), рассчитанные при анализе стационарных режимов. Рассчитывая динамические режимы, учитывают изменения на каждом шаге интегрирования системы дифференциальных уравнений, т.е. в определенных точках характеристики перехода от одной частоты вращения к другой, а также изменения величин и частот питающего напряжения (в соответствии с используемым законом частотного регулирования), параметров схемы замещения, вышеуказанных составляющих потерь [13]. При нагрузках вентиляторного и тягового характера изменяется также момент нагрузки, значение которого, соответствующее угловой частоте вращения привода, определяется по нагрузочной характеристике.

Потребляемая двигателем условная активная мощность в динамических режимах рассчитывается через матрицы напряжений и токов, учитывающие ν гармонических составляющих:

$$P'_1 = \frac{3}{2} [\mathbf{U}_{s\alpha\nu} \mathbf{I}_{s\alpha\nu} + \mathbf{U}_{s\beta\nu} \mathbf{I}_{s\beta\nu}].$$

Реальная потребляемая активная мощность P_1 больше условной на величину суммы неучтенных потерь (в магнитопроводе, добавочных, механических):

$$P_1 = P'_1 + \Delta P_{ст\ осн} + \Delta P_{ст\ доб} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}.$$

Мощность на валу двигателя может быть определена через матрицы потокосцеплений и токов с использованием значения частоты вращения ротора:

$$P_2 = \omega_r \frac{3p}{2} [\mathbf{I}_{r\beta\nu} \Psi_{r\alpha\nu} - \mathbf{I}_{r\alpha\nu} \Psi_{r\beta\nu}] - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}.$$

Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений полезной мощности на валу двигателя к потребляемой активной мощности P_1 .

При быстром снижении частоты питания возможен переход асинхронной машины из двигательного режима в генераторный. В этом случае КПД определяется как отношение электрической мощности к механической на валу машины.

Электрические потери в обмотках АД в динамических режимах

$$\begin{aligned} \Delta P_9 &= \Delta P_{91} + \Delta P_{92} = \\ &= \frac{3}{2} \left((R_s \mathbf{I}_{s\alpha\nu}) \mathbf{I}_{s\alpha\nu} + (R_s \mathbf{I}_{s\beta\nu}) \mathbf{I}_{s\beta\nu} + \right. \\ &\quad \left. + (R_r \mathbf{I}_{r\alpha\nu}) \mathbf{I}_{r\alpha\nu} + (R_r \mathbf{I}_{r\beta\nu}) \mathbf{I}_{r\beta\nu} \right). \end{aligned}$$

Потребляемая двигателем условная полная мощность в динамических режимах также определяется через матрицы напряжений и токов:

$$S'_1 = \frac{3}{2} \sqrt{[\mathbf{U}_{s\alpha\nu} \mathbf{U}_{s\alpha\nu} + \mathbf{U}_{s\beta\nu} \mathbf{U}_{s\beta\nu}] \times [\mathbf{I}_{s\alpha\nu} \mathbf{I}_{s\alpha\nu} + \mathbf{I}_{s\beta\nu} \mathbf{I}_{s\beta\nu}]}$$

Полная мощность при несинусоидальном питании состоит из активной, реактивной мощностей и мощности искажения. Сумма квадратов потребляемых двигателем реактивной мощности Q_1 и мощности искажения T_1

$$Q_1^2 + T_1^2 = S_1'^2 - P_1'^2.$$

Реальная потребляемая двигателем полная мощность с учетом всех потерь

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T_1^2} = \sqrt{P_1^2 + S_1'^2 - P_1'^2}.$$

Величина мгновенного значения коэффициента мощности определяется как отношение мгновенных значений потребляемой активной мощности P_1 к реально потребляемой двигателем полной мощности S_1 .

В случае рассмотрения работы АД в частотном электроприводе с транзисторным преобразователем, использующим широтно-импульсную модуляцию, можно пренебречь гармоническими составляющими и, соответственно, мощностью искажения.

При частотном регулировании асинхронный двигатель может работать в очень широком диапазоне мощностей, определяемом диапазоном частоты вращения и изменением момента нагрузки. Вследствие этого оценка работы привода по зависимости изменения КПД во времени должна быть дополнена интегральным показателем эффективности электромеханического преобразо-

вания энергии. Таким показателем является среднее значение КПД η_{cp} , рассчитанное исходя из произведенной полезной механической работы $A_{мех}$ и потребленного количества электроэнергии $E_{эл}$ за определенный промежуток времени $\Delta t = t_1 - t_0$:

$$\eta_{cp} = \frac{A_{мех}}{A_{эл}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} P_2(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} P_1(t) dt}.$$

На рис.1 и 2 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований нестационарных режимов.

В [14] описаны теоретические и экспериментальные исследования динамических характеристик асинхронного двигателя АИР71А2У3. Двигатель после пуска работал по следующей тахограмме: 1с – 1800 об/мин, 1с – 3000 об/мин, 1с – 4000 об/мин, 2с – 1200 об/мин. Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял 0,0025 кг·м². Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, описываемую уравнением $M = 0,2 + 6,25 \cdot 10^{-4} n$.

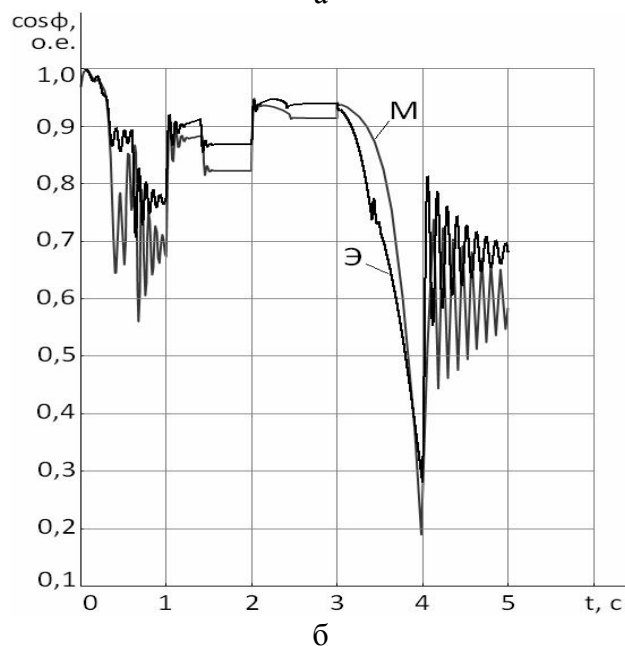
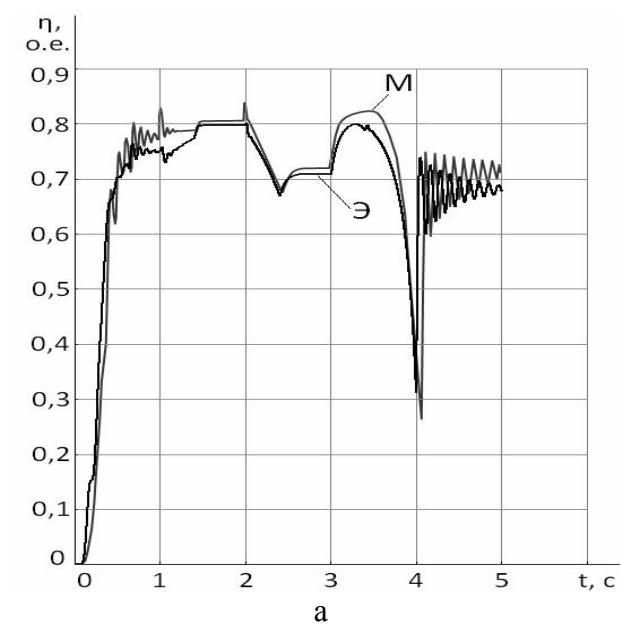


Рис.1. Изменение энергетических показателей при $U/f = \text{const}$:
а – КПД; б – коэффициента мощности;
М – моделирование; Э – эксперимент

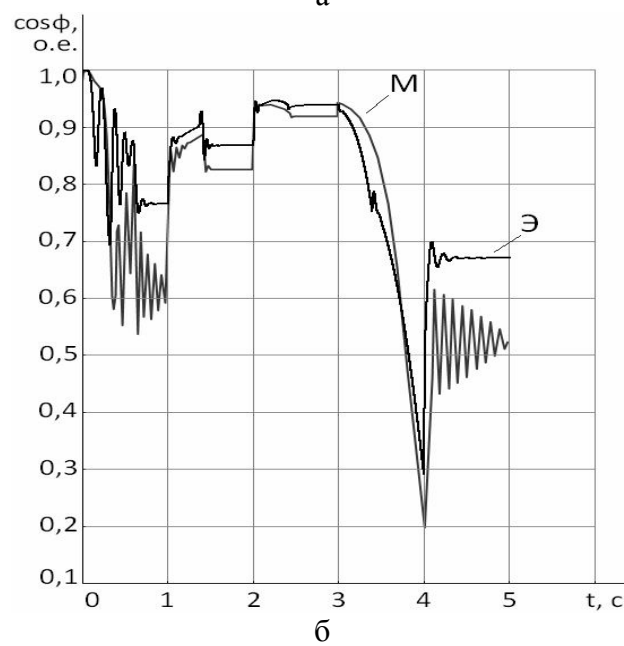
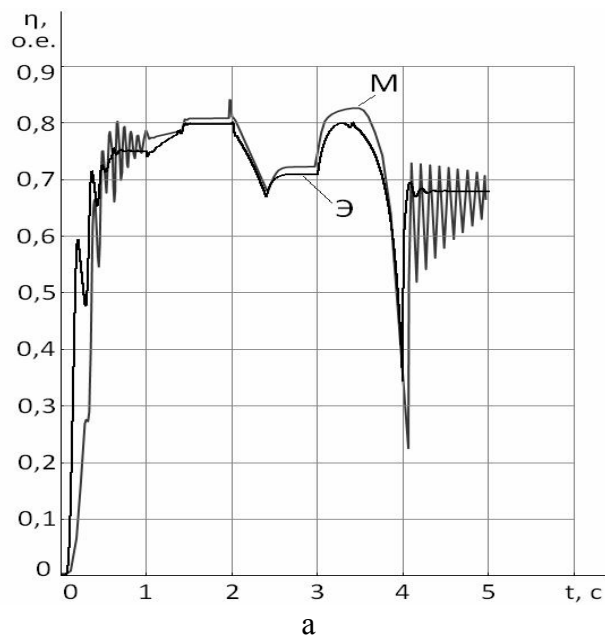


Рис.2. Изменение энергетических показателей при $\Psi_2 = \text{const}$:
а – КПД; б – коэффициента мощности;
М – моделирование; Э – эксперимент

Питание двигателя обеспечивалось транзисторным частотным преобразователем серии Altivar 28 фирмы Telemecanique. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Преобразователь частоты, имел следующие настройки: $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$ и $f_{\text{ном}} = 50 \text{ Гц}$, частота модуляции 4 кГц. Скорость нарастания частоты при переходных процессах составляла 50 Гц/с. Характеристики получены для двух законов частотного управления: $U/f = \text{const}$ и $\Psi_2 = \text{const}$. С целью экспериментального определения действующих значений тока и напряжения проводилось их осциллографирование.

Было проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований энергетических показателей – КПД (η) и коэффициента мощности ($\cos\phi$) асинхронного двигателя АИР71А2У3.

Полученные зависимости позволяют сделать следующие выводы:

результаты экспериментальных исследований подтверждают корректность математического моделирования;

на характер изменения мгновенных значений энергетических показателей мало влияет закон частотного управления;

при пуске с законом частотного управления $\Psi_2 = \text{const}$ наблюдаются большие колебания мгновенных значений η и $\cos\phi$, чем при пуске с законом $U/f = \text{const}$;

результаты моделирования энергетических показателей при существенном снижении числа оборотов (4-я ступень тахограммы) численно значительно отличаются от результатов эксперимента, а при законе $\Psi_2 = \text{const}$ отличается и характер изменения (при моделировании больше колебания). Особенно это проявляется при сопоставлении кривых коэффициента мощности;

использование вышеописанного алгоритма расчета мгновенных значений энергетических показателей позволило в среднем на 6 % снизить погрешность определения η и на 2 % погрешность определения $\cos\phi$ по сравнению с определением без учета основных и добавочных потерь в стали, механических и добавочных потерь в сопоставлении с энергетическими показателями, определенными для статических режимов;

определяя КПД всего электропривода, следует учитывать потери в преобразователе. При работе АД в генераторном режиме возможен возврат энергии в сеть или энергия торможения гасится на тормозном реостате. В последнем случае КПД привода равен нулю.

Список использованной литературы

1. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод /Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. /Под ред. Браславского И.Я. – М.: Академия, 2004. – 256 с.

2. Петрушин В.С. Влияние насыщения магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на энергетические показатели регулируемых асинхронных двигателей /Петрушин В.С., Якимец А.М., Каленик Б.В. // Электротехника і електромеханіка. – №1. – 2008. – С. 38- 40.

3. Петрушин В.С. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно-временных гармоник /Петрушин В.С., Якимец А.М., Груша А.В., Каленик О.В. //Электромашинобуд.та електрообладн. – Вып. 70. – 2008. – С. 68 - 71.

4. Петрушин В.С. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления /Петрушин В.С., Таньков А.А // Электромашинобуд.та електрообладн. – Вып. 55. – 2000. – С. 11 – 15.

5. Петрушин В.С. Энергетические показатели асинхронных двигателей в электроприводах с автономными инверторами тока при различных законах управления /Петрушин В.С., Якимец А.М //Тр.Одесск.политехн.ун-та. – 2003. – Вып.2(20). – С. 82 - 85.

6. Петрушин В.С. Сопоставление энергетических показателей асинхронных двигателей электроприводов с автономными инверторами тока и напряжения /Петрушин В.С., Якимец А.М. //Проблемы автоматизированного привода. Вест.Нац.техн.ун-та “ХПИ” – 2003. – Вып. 10. – Т.2. – С. 495- 496.

7. Чермалых В.М. Исследование динамики и энергетических показателей асинхронного электропривода с векторным управлением методом виртуального модели-

рования /Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я. //Проблемы автоматизированного электропривода. Вест.Нац.техн. ун-та "ХПИ". – 2008. – Вып. 16. – С. 41 – 45.

8. Пронин М.В. Моделирование систем с асинхронными машинами и транзисторными преобразователями с учетом потерь энергии /Пронин М.В., Воронцов А.Г., Терещенков В.В. //Изв. ВУЗов "Электромеханика". – № 3. – 2008. – С. 33 - 38.

9. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом электроприводе/ Виноградов А.Б //Электротехника. – № 5. – 2005. – С.57-61.

10. Мощинский Ю.А. Обобщенная математическая модель частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом потерь в стали /Мощинский Ю.А., Аунг Вин Тут //Электричество. – 2007. – № 11. – С.60-66.

11. Малафеев С.И. Исследование потерь в асинхронном двигателе с частотным регулированием при переходных процессах / Малафеев С.И., Захаров А.В. //Электротехника. – № 7. – 2008. – С.2 - 5.

12. Петрушин В.С. Программный продукт „DIMAS-Drive”. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свид. о регист.программы ПА№4065). /Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. – К.: Гос.департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

13. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. Уч.пособие /Петрушин В.С. // Одесса: Наука и техника, 2006. – 320 с.

14. Петрушин В.С. Влияние насыщения стали магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора на динамические характеристики регулируемых асинхронных двигателей /Петрушин В.С., Бухалфа Бендахман, Якимец А.М., Каленик О.В. // Електротехніка і електромеханіка. – № 2. – 2010. – С.21- 23.

Получено 16.03.2010



Петрушин
Виктор Сергеевич,
д-р техн. наук, проф.,
зав. каф. Эл.машин
Одес.нац.политехн.ун-та
раб. тел. (8048)779-74-94



Бухалфа Бендахман,
канд. техн. наук, проф.
Departement d'Electrotechnique
l'Université de Béjaïa
(Алжир)



Якимец
Андрей Миронович,
канд. техн. наук, доц.
каф. Эл.машин
Одес.нац.политехн.ун-та
раб. тел. (8048)779-76-80
yakimets_andriy@ukr.net



Каленик
Олег Витальевич,
Студент Ин-та эл.мех.и
энергомеджмента
Одес.нац.политехн.ун-та