

REFERENCES

1. Rassokhin V.A., Zabelin N.A., Matveyev Yu.V. *Nauchno-Tekhnicheskie vedomosti SPb GPU (Scientific-Technical Lists SPbGPU)*, 2011, № 4, pp. 41–51.
2. Pozhidayev V.M. *Akademiya energetiki (Energy Academy)*, 2005, № 4, pp. 26–33.
3. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I. Yu. et.al. *Turbogeneratory maloi moshchnosti dlya detsentralizovannykh system energoobespecheniya (Lacking Power Turbogenerators for Decentralizing Systems of Power Supply)*. SPb. Nauka, 2009, 102 p.
4. Danilevich Ya.B., Antipov V.N., Kruchinina I.Yu. et. al. *Izv. RAN. Energetika (News RAS. Power Engineering)*, 2009, № 4, pp. 89–97.
5. Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Size Spectrum Investigation of Mini Turbogenerators for Gas Turbine Units. Proc. of the XX Intern. Conf. on Electrical Machines. Marseille (France), 2012. — CD-ROM. — PID2412641.*
6. Antipov V.N., Kruchinina I.Yu., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2013, № 12, pp. 51–56.
7. Khutoretskii G.M., Andreyeva A.V., Drozdova L.A., Kosachevskii V.I. SPb. OEEF RAS, 2004, iss. 6, pp. 22–32.
8. Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I. *Proektirovaniye serii asinkhronnykh dvigatelei (Designing a Series of Induction motors)*. Moscow. Publ. «Energia», 1978, 479 p.

Authors: Viktor Nikolayevich Antipov graduated from the Leningrad Polytechnic Institute (LPI) in 1963. In 1989 he received the degree of Doctor Techn. Sci. He is a Leading Scientific Researcher from the Institute for the Chemistry of Silicates of the Russian Academy of Sciences (ICH S RAS).

Andrei Dmitriyevich Grozov graduated from LPI in 1979. He is a Scientific Researcher from ICH S RAS.

Anna Vladimirovna Ivanova graduated the Leningrad State University in 1979. In 1989 she received the degree of Cand. Techn.Sci. She is a Senior Scientific Researcher from ICH S RAS.

* * *

Управление частотой возбуждения асинхронизированного вентильного двигателя как способ повышения его энергоэффективности

ТУТАЕВ Г.М.

Асинхронная и синхронная машины, а также двигатель двойного питания являются частично управляемыми объектами. Основные требования к машине переменного тока могут быть в максимальной степени удовлетворены применением асинхронизированного вентильного двигателя (АВД). Он представляет собой вариант двойного питания со статическими преобразователями частоты на статоре и роторе. Это обеспечивает реализацию целого ряда энергетически эффективных алгоритмов. Рассмотренные в статье алгоритмы возбуждения АВД постоянным током $\omega_2=0$ и регулирования частоты возбуждения в функции электромагнитного момента $\omega_2=f(M_{эм})$ позволяют получить высокие значения КПД и $\cos \varphi_s$ в широком диапазоне нагрузок. Так, возбуждение АВД постоянным током обеспечивает $\cos \varphi_s \gg 1$ и $\eta=0,955$ при номинальной нагрузке. Базовый же двигатель 4AK250SB4УЗ имеет $\eta_n=0,905$ и $\cos \varphi_{sn}=0,9$. Общим недостатком предложенных алгоритмов является возможность их применения только в синхронной зоне регулирования угловой скорости ротора вследствие ограничения ресурсов преобразователя частоты статора и существенного возрастания потерь в стали с увеличением скорости.

Ключевые слова: асинхронизированный вентильный двигатель, многоканальное управление, статические преобразователи частоты, энергетическая эффективность

В последние годы как в зарубежных странах, так и в РФ особое внимание уделяется повышению энергоэффективности промышленного производства, внедрению новых энергосберегающих технологий в строительство, сельское хозяйство и быт. Важную роль при этом играет регулируемый электропривод (ЭП). В настоящее время наиболее распространены регулируемые ЭП на базе машин переменного тока. Однако ни асинхронная, ни синхронная машины, ни классический двигатель двойного питания (ДДП) не отвечают полностью требованиям, предъявляемым к машине переменного тока, и являются частично управляемыми объектами [1].

В максимальной степени основные требования к машине переменного тока могут быть удовлетворены применением асинхронизированного вентильного двигателя (АВД), который можно отнести к управляемым машинам [2]. АВД представляет собой вариант ДДП со статическими преобразователями частоты в статоре и роторе. Наличие двух преобразователей позволяет организовать многоканальное управление — угловой скоростью, магнитным потоком, активными потерями и реактивной мощностью. Это обеспечивает реализацию целого ряда энергетически эффективных алгоритмов [3–6]:

возможность работы с постоянным магнитным потоком и фиксированной частотой возбуждения

при различных углах сдвига фаз между векторами тока и напряжения статора j_1 ;

ортогональное управление при фиксированной частоте возбуждения;

ортогональное управление при изменении частоты возбуждения, обеспечивающем минимум потерь в стали статора;

минимум токов статора и ротора;

минимум суммарных потерь.

Проведенные исследования выявили существенную зависимость энергетических характеристик АД от частоты возбуждения [6, 7]. Установлено, что ее регулирование в функции угловой скорости ротора вплоть до перехода на встречное вращение магнитного поля и ротора и выполнение условия

$$w_1 = -w_2 = \frac{w_e}{2} \quad (1)$$

обеспечивают минимум потерь в стали статора и, соответственно, высокий КПД (рис. 1,а).

Суммарный коэффициент мощности $\cos j_\Sigma$ цепей статора и ротора уменьшается с ростом частоты возбуждения (рис. 1,б).

Энергетические характеристики АД, представленные на рис. 1, получены при ортогональном алгоритме управления и скорости ротора $w_e = w_c$.

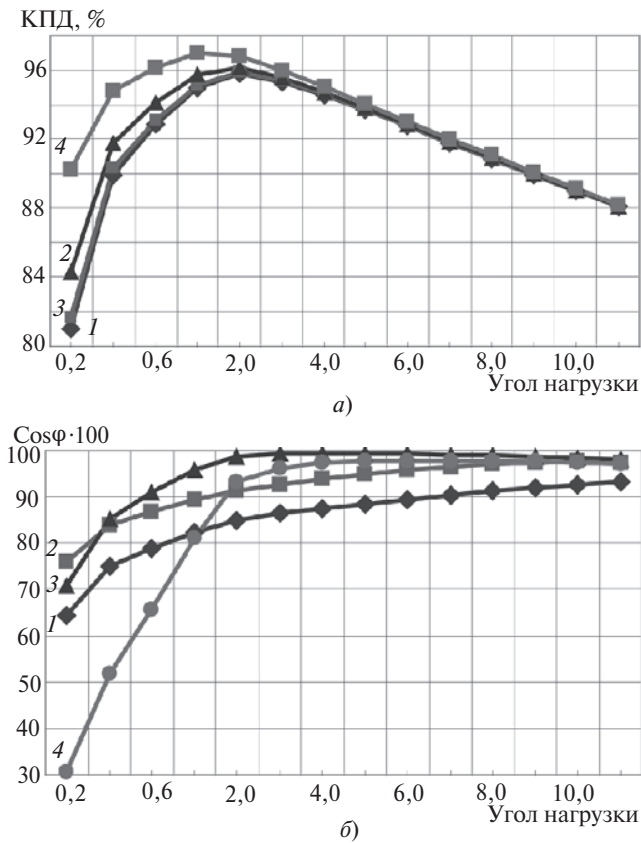


Рис. 1. Коэффициент полезного действия (а) и $\cos j$ (б) АД при различной частоте возбуждения: 1 – $f_2 = 5$ Гц; 2 – -5 Гц; 3 – 3 Гц; 4 – -25 Гц

Зависимость энергетических характеристик АД от частоты возбуждения объясняется наличием в обмотке ротора ЭДС скольжения фиксированной частоты, которая обуславливает возможность возврата части активной мощности скольжения в питающую сеть, либо ее потребление при определенных значениях угловой скорости ротора, частоты возбуждения, нагрузки на валу и направлении вращения ротора относительно магнитного поля. Все это иллюстрируется векторной диаграммой АД (рис. 2).

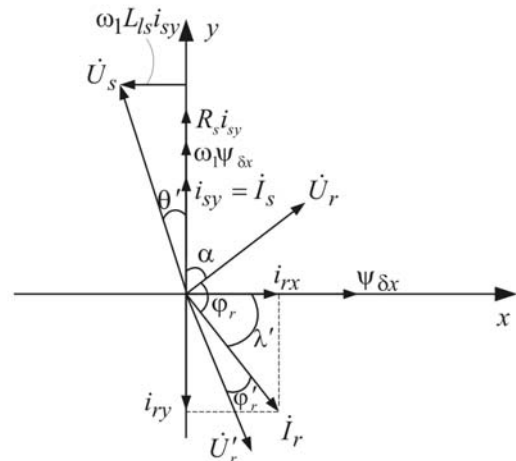


Рис. 2. Векторная диаграмма АД при реализации энергоэффективных алгоритмов управления

На векторной диаграмме обозначены: $\varphi\phi$ – угол нагрузки АД; α – фаза вектора напряжения ротора U_r , определяемая частотой возбуждения; $l\phi$ – фаза тока ротора I_r относительно вектора магнитного потока $Y_d = Y_{dx}$; j_r – фаза вектора тока ротора I_r относительно вектора напряжения ротора U_r ; $U\phi$ – вектор напряжения ротора при переходе на встречное вращение магнитного поля и ротора (при «отрицательной» частоте возбуждения); $j\phi$ – фазовый угол сдвига вектора тока ротора I_r относительно вектора напряжения ротора $U\phi$ при «отрицательной» частоте возбуждения.

Система координат x, y ориентирована по вектору основного магнитного потока ($Y_d = Y_{dx}$ и $Y_{dy} = 0$). Система управления выходным звеном преобразователя частоты (ПЧ) статора обеспечивает ортогональность векторов тока статора и магнитного потока ($I_s \wedge Y_d$). При этом $j_1 = \varphi\phi$, $i_{sx} = 0$, $i_{sy} = -i_{ry}$. Намагничивание машины обеспечивается

составляющей тока ротора i_{rx} , которая либо остается постоянной при ортогональном управлении, либо изменяется в функции требуемого электромагнитного момента в алгоритмах минимума токов и суммарных потерь. При увеличении нагрузки на валу будут расти моментобразующие составляющие токов статора и ротора $i_{sx} = -i_{ry}$, угол нагрузки φ ($\varphi = 2,92^\circ$ для двигателя 4AK250SB4Y3, $P_{2H} = 55$ кВт, $h = 0,905$ и $\cos j_s = 0,9$) и фаза тока ротора ψ

Частота возбуждения w_2 определит угол α и соответственно $\cos j_r$ цепи ротора. Уменьшение частоты возбуждения не только снижает потери в стали статора, но и приводит к возрастанию $\cos j_s$ двигателя. Однако при выполнении условия (1) сменится направление вращения поля ротора и положение вектора напряжения ротора \vec{U}_ψ (см. рис. 2). Ток ротора по-прежнему будет отстающим, но угол j_ψ при высоких скоростях ротора будет значительным, определяя тем самым низкий суммарный коэффициент мощности АД на низких нагрузках (рис. 1,б). При возрастании нагрузки положение вектора \vec{U}_ψ меняется незначительно, а вектор тока ротора \vec{I}_r приближается к нему, так как i_{ry} увеличивается, а $i_{rx} = \text{const}$. Соответственно увеличивается и $\cos j_s$.

В [6] было установлено, что высокие значения $\cos j_s$ достижимы при отсутствии рекуперации активной мощности статора в сеть, т.е. при потреблении активной мощности и со стороны обмотки возбуждения ($P_r > 0$). Минимальное значение частоты возбуждения, при котором во всем диапазоне нагрузок будет отсутствовать рекуперация энергии, определится соотношением:

$$w_{2\text{опт}} \approx \frac{R_r (\text{tg}^2 \alpha + 1)}{L_m \text{tg} \alpha} = \frac{R_r (\text{ctg}^2 \alpha + 1)}{L_m \text{ctg} \alpha} \quad (3)$$

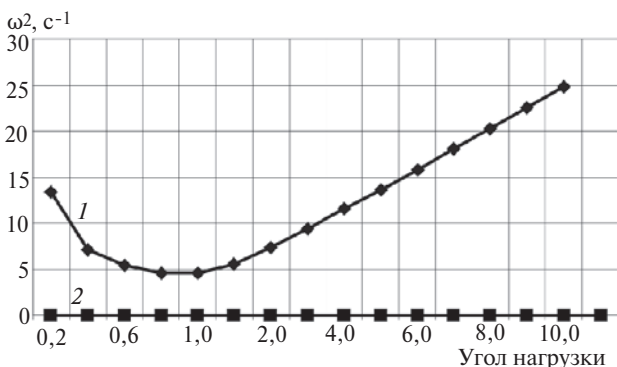


Рис. 3. Изменение частоты возбуждения (1); отсутствие рекуперации энергии (2 – $P_r \gg 0$)

Это позволяет управлять частотой возбуждения в функции требуемого электромагнитного момента $w_2 = f(M_{эм})$ (рис. 3).

Для получения энергетических характеристик использована математическая модель статического режима АД из [6] (рис. 4).

Сравнение энергетических характеристик АД при ортогональном управлении и двух вариантах регулирования частоты возбуждения (рис. 1 и 4) говорит о том, что изменение частоты возбуждения в функции электромагнитного момента $w_2 = f(M_{эм})$ обеспечивает значительно более высокие значения $\cos j_s$, но КПД при этом будет ниже за счет более высоких потерь в стали. Особенно это сказывается при низких нагрузках на валу, когда влияние потерь в стали наиболее существенно.

При возбуждении АД постоянным током ($w_2 = 0$) может быть обеспечен $\cos j_s \gg 1$ в диапазоне нагрузок до двух номинальных P_{2H} (2φ) и очень высокий при существенных перегрузках (рис. 4). Снижение $\cos j_s$ при высоких нагрузках объясняется уменьшением коэффициента мощности цепи статора ($j_1 = \varphi$). КПД обоих режимов регулирования частоты возбуждения практически одинаковы.

Недостатком алгоритмов регулирования частоты возбуждения в функции электромагнитного момента $w_2 = f(M_{эм})$ и возбуждения АД постоянным током $w_2 = 0$ является их применение только в подсинхронной зоне регулирования скорости ротора вследствие ресурсных ограничений ПЧ статора.

Проведем сравнительный анализ энергетической эффективности алгоритмов управления АД:

- с постоянным магнитным потоком и углом сдвига фаз между векторами тока и напряжения статора $j_1 = 0$;
- ортогонального управления;
- минимума токов статора и ротора;
- минимума суммарных потерь;

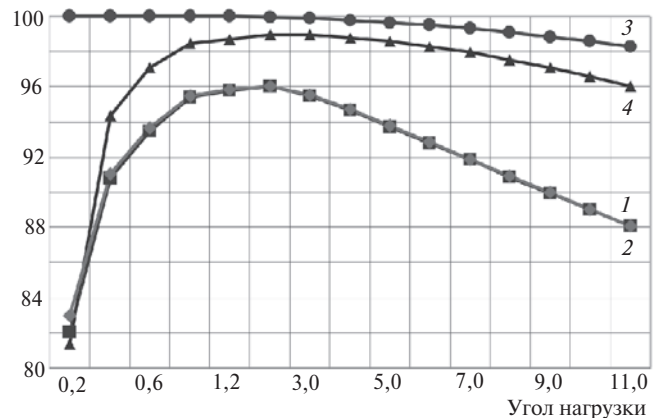


Рис. 4. Энергетические характеристики АД: 1, 2 – КПД (%); 3, 4 – $\cos j_s \times 100$; 1, 3 – $w_2 = 0$; 2, 4 – $w_2 = f(M_{эм})$ при $w_2 = f(M_{эм})$ и $w_2 = 0$

для скоростей ротора $w_e = 0,25w_{eH}$ и $w_e = w_{eH}$ при регулировании частоты возбуждения в функции электромагнитного момента $w_2 = f(M_{эм})$, в функции угловой скорости ротора (1) и возбуждении АД постоянным током $w_2 = 0$ по критериям, предложенным в [8].

В качестве эталонного алгоритма управления выбираем минимум суммарных потерь в обмотках якоря и возбуждения АД при выполнении условия (1). Результаты анализа эффективности алгоритмов управления АД по суммарным потерям и скорости ротора $w_e = 0,25w_{eH}$ приведены на рис. 5, а.

В этом случае все алгоритмы можно разделить на две группы:

первая с высокой эффективностью во всем диапазоне нагрузок;

вторая с низкой эффективностью в области малых нагрузок.

К первой группе относятся алгоритмы минимума токов и минимума суммарных потерь при различных вариантах регулирования частоты возбуждения w_2 , в которых магнитное состояние машины изменяется в функции требуемого электромагнитного момента.

Во вторую группу входят алгоритмы ортогонального управления и с постоянным магнитным потоком и углом сдвига фаз между векторами тока и напряжения статора $j_1 = 0$.

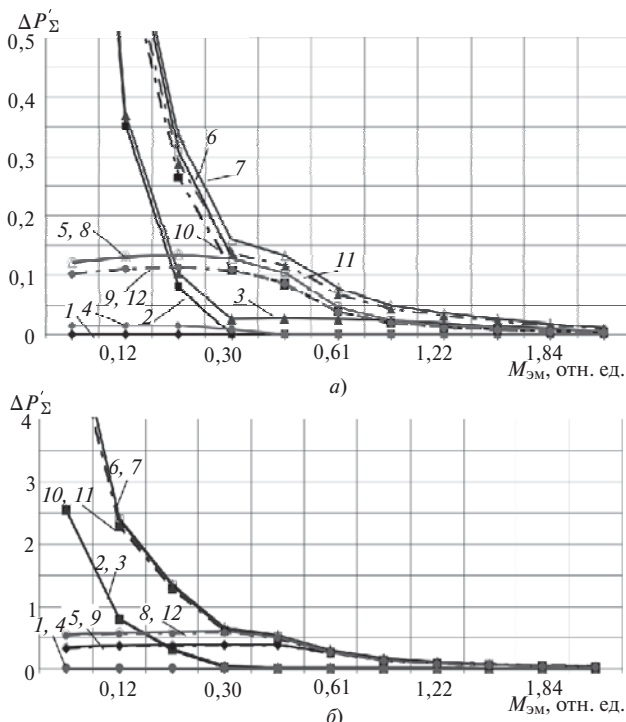


Рис. 5. Эффективность алгоритмов управления АД по суммарным потерям: а – $w_e = 0,25w_{eH}$; б – $w_e = w_{eH}$; 1–4 – при $w_2 = w_e/2$: 1 – $\min S$ потерь; 2 – $\gamma \wedge I$; 3 – $j_1 = \text{const}$; 4 – $\min I$; 5–8 – при $w_2 = f(M_{эм})$: 5 – $\min S$ потерь; 6 – $\gamma \wedge I$; 7 – $j_1 = \text{const}$; 8 – $\min I$; 9–12 – при $w_2 = 0$: 9 – $\min S$ потерь; 10 – $\gamma \wedge I$; 11 – $j_1 = \text{const}$; 12 – $\min I$

Именно постоянство магнитного потока на низких нагрузках обуславливает большие потери в АД при реализации данных алгоритмов.

Некоторые различия в эффективности алгоритмов внутри указанных групп объясняются разными значениями потерь в стали в зависимости от варианта регулирования частоты возбуждения w_2 .

При увеличении угловой скорости ротора до $w_e = w_{eH}$ (рис. 5, б) тенденция в целом сохраняется, но наблюдается снижение эффективности всех алгоритмов относительно эталонного за счет увеличения потерь в стали.

Совершенно иную картину получаем при анализе эффективности этих же алгоритмов по сочетанию КПД и $\cos j_\Sigma$. Здесь явное преимущество во всем диапазоне нагрузок имеют алгоритмы возбуждения АД постоянным током и регулирования частоты возбуждения в функции электромагнитного момента $w_2 = f(M_{эм})$ (рис. 6). Проигрывая по КПД алгоритмам при управлении частотой возбуждения по закону (1) (рис. 5), они имеют более высокие значения $\cos j_\Sigma$.

С ростом нагрузки эффективность всех алгоритмов возрастает и примерно одинакова в области номинальной нагрузки. Это объясняется увеличением $\cos j_\Sigma$ за счет роста активной составляющей тока ротора i_{ry} при неизменной реактивной составляющей i_{rx} , так как выполняется условие $Y_d = Y_{dH} = \text{const}$ (см. рис. 2). Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к снижению эффективности всех алгоритмов, поскольку начинает влиять уменьшение $\cos j_1$ цепи якоря ($\varphi \neq j_1$), что приво-

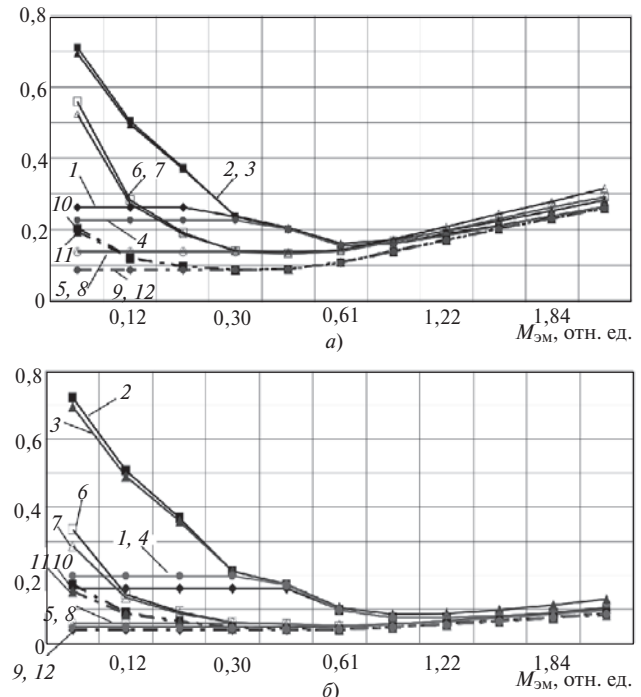


Рис. 6. Эффективность алгоритмов управления АД по КПД и $\cos j_\Sigma$: а – $w_e = 0,25w_{eH}$; б – $w_e = w_{eH}$; 1–12 – то же, что на рис. 5

дит к снижению суммарного коэффициента мощности двигателя $\cos \varphi$.

Выводы. Реализация различных вариантов управления частотой возбуждения асинхронизированного вентильного двигателя оказывает значительное влияние на его энергетические характеристики. Рассмотренные в данной статье алгоритмы возбуждения АД постоянным током $w_2 = 0$ и регулирования частоты возбуждения в функции электромагнитного момента $w_2 = f(M_{эм})$ позволяют получить высокие значения КПД и $\cos \varphi$ в широком диапазоне нагрузок. Так, возбуждение АД постоянным током обеспечивает $\cos \varphi \gg 1$ и $\eta = 0,955$ при номинальной нагрузке. Базовый же двигатель 4AK250SB4Y3 имеет $\eta = 0,905$ и $\cos \varphi_n = 0,9$.

Общим недостатком предложенных алгоритмов является возможность их применения только в подсинхронной зоне регулирования угловой скорости ротора вследствие ограничения ресурсов ПЧ статора и существенного возрастания потерь в стали с увеличением скорости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. — М.: Наука, 1969, 142 с.
2. Тутаев Г.М. Асинхронизированный вентильный двигатель как многоканальный объект управления. — Электричество, 2013, № 10, с. 48–51.
3. Тутаев Г.М. Энергоэффективное управление двигателем двойного питания в установившихся режимах. — Электротехнические комплексы и системы управления, 2011, № 2, с. 52–58.
4. Копылов И.П., Сонин Ю.П., Гуляев И.В., Вострухин А.А. Асинхронизированный вентильный двигатель с ортогональным управлением. — Электротехника, 2002, № 9, с. 2–4.
5. Копылов И.П., Сонин Ю.П., Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Асинхронизированный вентильный двигатель с поддержанием неизменного результирующего магнитного потока. — Электротехника, 2000, № 8, с. 59–62.
6. Тутаев Г. М., Гуляев И.В., Маняев И.В. Исследование энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на статической модели. — Электротехнические комплексы и системы управления, 2010, № 4, с. 2–7.
7. Гуляев И.В., Тутаев Г.М., Маняев И.В. Влияние частоты возбуждения на энергетические характеристики асинхронизированного вентильного двигателя. — Изв. ТулГУ. Технические науки, 2010, вып. 3; ч. 2, с. 81–88.
8. Тутаев Г.М. Оценка энергетической эффективности алгоритмов управления асинхронизированным вентильным двигателем. — Электричество, 2014, № 1, с. 28–32.

[18.11.13]

Controlling the Excitation Frequency of an Asynchronized Converter-Fed Motor as a Method for Improving Its Efficiency

G.M. TUTAEV

An asynchronous machine, a synchronous machine, and a double-fed motor are partially controlled components. The main requirements imposed on an AC machine can be met to the fullest extent through the use of an asynchronized converter-fed motor (ACFM). Such motor is a version of a double-fed machine fitted with static frequency converters in the stator and rotor. With this arrangement, a number of energy-efficient algorithms can be implemented. The considered algorithms for exciting an ACFM with direct current $w_2=0$ and for adjusting the excitation frequency as a function of electromagnetic torque $w_2=f(M_{em})$ make it possible to obtain high values of efficiency and $\cos \varphi$ in a wide range of loads. Thus, with an ACFM excited by direct current, it is possible to obtain $\cos \varphi = 1$ and $\eta = 0.955$ at the nominal load, whereas the basic Type 4AK250SB4Y3 motor has $\eta = 0.905$ and $\cos \varphi_n = 0.9$. The common drawback of the proposed algorithms is that they can be used only in the synchronous zone of controlling the rotor angular speed due to limited capacities of the stator frequency converter and due to an essential growth of iron losses with increasing the speed.

Key words: asynchronized converter-fed motor, multichannel control, static frequency converters, energy efficiency

REFERENCES

1. Botvinnik M.M., Shakaryan Yu.G. *Upravlyayemaya mashina peremennogo toka* (Controlled AC machine). Moscow. Publ. «Nauka», 1969, 142 p.
2. Tutayev G.M. *Elektrichestvo* (Electricity), 2013, № 10, pp. 48–51.
3. Tutayev G.M. *Elektrotechnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya* (Electrotechnical Complexes and Controlled Systems), 2011, № 2, pp. 52–58.
4. Kopylov I.P., Sonin Yu.P., Gulyayev I.V., Vostrukhin A.A. *Elektrotehnika* (Electrical Engineering), 2002, № 9, pp. 2–4.

5. Kopylov I.P., Yu.P. Sonin, Gulyayev I.V., Tutayev G.M. *Elektrotehnika* (Electrical Engineering), 2000, № 8, pp. 59–62.
6. Tutayev G.M., Gulyayev I.V., Manyayev I.V. *Elektrotehnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya* (Electrotechnical Complexes and Controlled Systems), 2010, № 4, pp. 2–7.
7. Gulyayev I.V., Tutayev G.M., Manyayev I.V. *Izv. TulGU. Tekhnicheskiye nauki* (News of Tula State University. Technical Sciences), 2010, iss. 3, part 2, pp. 81–88.
8. Tutayev G.M. *Elektrichestvo* (Electricity), 2014, № 1, pp. 28–32.

Author: Gennadii Mikhailovich Tutayev graduated from the Mordva State University (MSU) in 1986. In 2002 he received the degree of Cand. Techn. Sci. from the Nizhegorodskii State University. He is Associate Professor in MSU.

Автор: Тутаев Геннадий Михайлович окончил факультет электроники и автоматики Мордовского государственного университета (МГУ) им. Н.П. Огарёва в 1986 г. В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию в Нижегородском государственном техническом университете. Доцент кафедры электроники и нанoeлектроники МГУ им. Н.П. Огарёва.