

УДК 621.313

ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ

ПУСК В ХОД И РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ МОЩНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО РЕДУКТОРА

Ключевые слова: вентильная машина, датчик положения магнитного поля, преобразователь частоты магнитного редуктора, электромагнитные моменты, числа пар полюсов, мощности преобразователя частоты и электродвигателя.

Рассматривается магнитный редуктор, обмотка статора которого получает питание в режиме вентильной машины. При отсутствии этого питания электродвигатель может запускаться в ход в режиме отсутствия нагрузки. Для существенного снижения мощности преобразователя частоты магнитного редуктора по сравнению с мощностью регулируемого электродвигателя необходимо число пар полюсов ротора с постоянными магнитами магнитного редуктора выполнять достаточно большим. В этом случае наиболее адекватна конструкция расположения магнитов в радиальных пазах, обеспечивающая концентрацию магнитного потока полюсов в воздушном зазоре. Обмотка статора такого магнитного редуктора будет малополюсной. При изготовлении магнитного редуктора можно использовать статорный сердечник серийной асинхронной машины вместе со штатной его обмоткой. Электромагнитные моменты роторов магнитного редуктора являются следствием наличия электромагнитного момента статора. Частота тока статора представлена двумя слагаемыми, из которых первая определяется из уравнений состояния, а вторая является константой, формирующей дополнительный канал функционального воздействия. Скорости вращения валов редуктора можем регулировать, изменяя указанную константу и входное напряжение преобразователя частоты. Уравнения состояния магнитного редуктора, описывающие его функциональные режимы, решались средствами математической программы Mathcad.

Пуск и регулирование скорости вращения мощных высоковольтных электроприводов реализуются с помощью преобразователей частоты или тиристорных регуляторов напряжения [1, 6]. Основная задача последних – снижение пусковых токов, так как их возможности в части регулирования скорости сравнительно ограничены.

Аналогичными свойствами обладает электропривод с гидромуфтой, применяемый для регулирования частоты вращения конвейеров, насосов, компрессоров и других механизмов [4].

Применение регулируемых магнитных редукторов [2], имеющих в своём составе ПЧ, причём с мощностью, существенно меньшей мощности электродвигателя, позволяет электроприводу иметь те же функциональные возможности, что и в вышеназванных системах.

Такие редукторы могут быть двух типов. У первого типа обмотка статора работает в режиме вентильной машины, у которой фаза тока привязана к вектору ЭДС холостого хода с помощью датчика положения магнитного поля или его имитатора. Скорости вращения валов этого редуктора регулируются изменением напряжения на входе ПЧ. Как известно, у вентильных машин, которые во многом аналогичны коллекторным машинам постоянного тока, нет проблем с устойчивостью из-за «опрокидывания» ротора.

У редукторов второго типа датчик положения отсутствует, и скорости валов регулируются изменением частоты ПЧ. Режим обмотки статора аналогичен ее режиму синхронной машины, подключённой к сети с регулируемой частотой. Очевидно, такие регулируемые магнитные редукторы обладают пределами устойчивости по моменту.

В настоящей статье рассматривается математическая модель управляемого магнитного редуктора первого типа.

Электромагнитные моменты и мощности магнитного редуктора. Магнитный редуктор (МР) с трёхфазной обмоткой на статоре, питаемой от статического преобразователя частоты синусоидальным током, который находится в фазе или в противофазе с ЭДС холостого хода обмотки (благодаря датчику положения магнитного поля в воздушном зазоре), будет иметь в этом режиме максимальные значения электромагнитных моментов валов, пропорциональные току статора. У такого редуктора будет отсутствовать «опрокидывание» роторов до тех пор, пока преобразователь частоты при росте нагрузки способен наращивать свой ток.

Отметим конструктивные и электромагнитные особенности МР.

Обмотка статора с p_1 парами полюсов подключена к ПЧ. Её ток частоты ω_1 в системе координат d, q является поперечным $i_q = I_m$.

Ближайший к статору первый (наружный) ротор с электромагнитным моментом M_1 и скоростью вращения Ω_1 является преобразователем (модулятором) полюсности магнитного поля, состоящим из z сквозных ферромагнитных шихтованных зубцов.

Второй (внутренний) ротор с электромагнитным моментом M_2 и скоростью вращения Ω_2 содержит электромагниты с числом пар полюсов p_2 .

Электромагнитный момент обмотки статора равен [2, 3]

$$M_s = \frac{3}{2} p_1 \Psi_d i_q = \pm \frac{6}{\pi} p_1 h_m L_{af} H_{CB} I_m, \quad (1)$$

где верхний знак соответствует двигательному, нижний – генераторному режимам обмотки статора; h_m, H_{CB} – высота и коэрцитивная сила магнитов; L_{af} – индуктивность взаимной индукции магнитов ротора с обмоткой статора:

$$L_{af} = \frac{\mu_0}{\pi\sqrt{2}} l \tau_1 \Lambda_{1m}'' w_1 k_{w1},$$

где Λ_{1m}'' – основная гармоника магнитной проводимости от магнитов ротора к статору.

Электромагнитные моменты роторов магнитного редуктора являются следствием наличия электромагнитного момента статора

$$M_1 = -M_s \frac{z}{p_1}, \quad M_2 = M_s \frac{z - p_1}{p_1}. \quad (2)$$

Для мощностей МР справедливы выражения

$$P_s = M_s \frac{\omega_1}{p_1}, \quad P_1 = M_s \Omega_1 \frac{z}{p_1}, \quad P_2 = M_s \Omega_2 \frac{z - p_1}{p_1}.$$

Будем полагать, что вал второго (внутреннего) ротора, несущего постоянные магниты, жёстко состыкован с валом электродвигателя. Тогда активная мощность ПЧ, совпадающая с электромагнитной мощностью P_3 , будет связана с мощностью электродвигателя P_2 отношением

$$\frac{P_3}{P_2} = \frac{\omega_1}{(z - p_1)\Omega_2}, \quad (3)$$

где разность $(z - p_1) = p_2$ есть число пар полюсов магнитов второго (внутреннего) ротора.

Выберем p_2 достаточно большим, предполагая использовать коллекторный способ крепления магнитов, обеспечивающий высокий уровень магнитной индукции в воздушном зазоре за счёт концентрации магнитного потока постоянных магнитов. С этой целью следует принять число пар полюсов p_1 обмотки статора минимально возможным: $p_1 = 1, 2, 3$.

В этом случае, имея $p_2 \approx z$, получим для отношения (3)

$$\frac{P_3}{P_2} \approx \frac{\omega_1}{z \Omega_2}.$$

Видим, что для снижения мощности ПЧ следует увеличивать число зубцов z модулятора.

Если, например, принять $p_1 = 3$, $p_2 = 20$, $z = 23$, то будем иметь при $\omega_1/\Omega = 2$ значение отношения мощностей (3)

$$\frac{P_3}{P_2} \approx 10.$$

Дифференциальные уравнения равновесия электрического и механических каналов редуктора. Уравнения механического движения для первого и второго роторов имеют вид

$$J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = M_1 - M_{\text{нг}}, \quad (4)$$

$$J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = M_{\text{эд}} - M_2, \quad (5)$$

где J_1, J_2 – суммарные моменты инерции, соответственно нагрузочного механизма с первым ротором (мультипликатором) и ротора электродвигателя со вторым ротором редуктора; $M_{\text{нг}}$ – момент нагрузочного механизма; $M_{\text{эд}}$ – момент электродвигателя.

Для тока статора будет справедливо дифференциальное уравнение, выражающее равновесие напряжений синхронной машины по оси q [3]:

$$L_q \frac{dI_{m1}}{dt} = U_{m1} \cos \theta_1 - E_{0m} - rI_{m1}, \quad (6)$$

где L_q, r – поперечная индуктивность и активное сопротивление обмотки статора; θ_1 – угол нагрузки; U_{m1} – амплитудное значение основной гармоники напряжения статора:

$$U_{m1} = \frac{1}{2} E,$$

E – входное напряжение инвертора преобразователя частоты [6]; E_{0m} – амплитудное значение ЭДС холостого хода:

$$E_{0m} = k \omega_1,$$

$$k = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} \mu_0 h_m H_{CB} l \tau_1 \Lambda''_{lm} w_1 k_{w1}.$$

Частота тока статора и угол нагрузки. Угловую частоту ω_1 тока статора будем подразделять на две составляющие

$$\omega_1 = \omega_{11} + \omega_{12},$$

из которых первая ω_{11} будет функцией времени, а вторая ω_{12} – регулирующей константой, значение которой позволяет воздействовать на установившиеся значения скорости выходного (нагрузочного) вала Ω_1 .

Первая часть частоты тока статора ω_{11} будет находиться путём дифференцирования базового равенства магнитного редуктора, связывающего скорости вращения роторов и угловую частоту тока статора ω_1 ,

$$\Omega_2 = \frac{z}{z - p_1} \Omega_1 + \frac{\omega_1}{z - p_1}, \quad (7)$$

и подстановки выражений (1), (2), (4), (5). В итоге получим

$$\frac{d\omega_{11}}{dt} = \frac{\frac{k_1}{p_1} \left[-J_1(z - p_1)^2 + J_2 z^2 \right] I_{m1} + \left[J_1(z - p_1) M_{эд} + J_2 z M_{нр} \right]}{J_1 J_2}, \quad (8)$$

где $k_1 = \frac{6}{\pi} p_1 h_m L_{af} H_{CB}$.

После использования производных базового равенства (7) можем исключить дифференциальное уравнение (5) из системы уравнений состояния, описывающих режим работы магнитного редуктора, а скорость электродвигателя Ω_2 считать заданной¹.

Для равновесия напряжений синхронной машины по оси d справедливо [3]

$$U_{m1} \sin \theta_1 = \omega_1 L_q I_{m1}. \quad (9)$$

Дифференцируя это равенство (9) и используя выражения для производных тока и частоты из формул (6) и (8), получим дифференциальное уравнение для угла нагрузки θ_1

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} = & \frac{\omega_1 (U_{m1} \cos \theta_1 - k \omega_1 - r I_{m1})}{U_{m1} \cos \theta_1} + \frac{L_q I_{m1}}{U_{m1} \cos \theta_1} \times \\ & \times \frac{\frac{k_1}{p_1} \left[-J_1(z - p_1)^2 + J_2 z^2 \right] I_{m1} + \left[J_1(z - p_1) M_{эд} + J_2 z M_{нр} \right]}{J_1 J_2}. \end{aligned}$$

¹ Пуск электродвигателя осуществляется на холостом ходу благодаря отключению обмотки статора магнитного редуктора от ПЧ.

На рис. 1–4 показаны результаты решения рассмотренных уравнений состояния применительно к магнитному редуктору¹, выполненному на базе асинхронного двигателя АИР 132 М6 У2 мощностью 7,6 кВт.

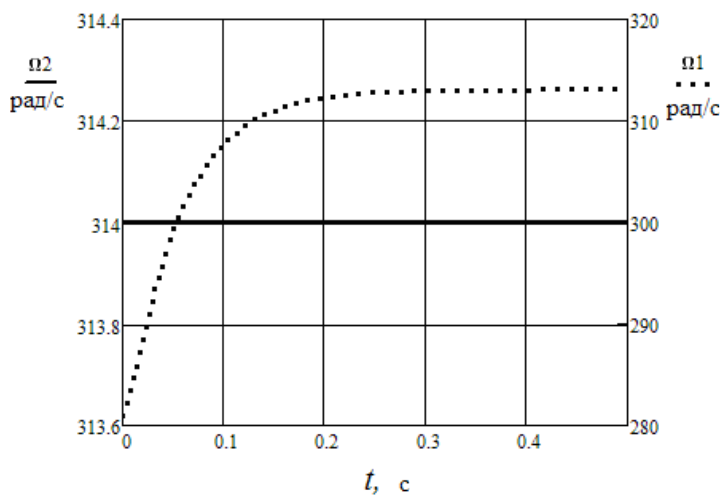


Рис. 1. Скорости вращения валов редуктора

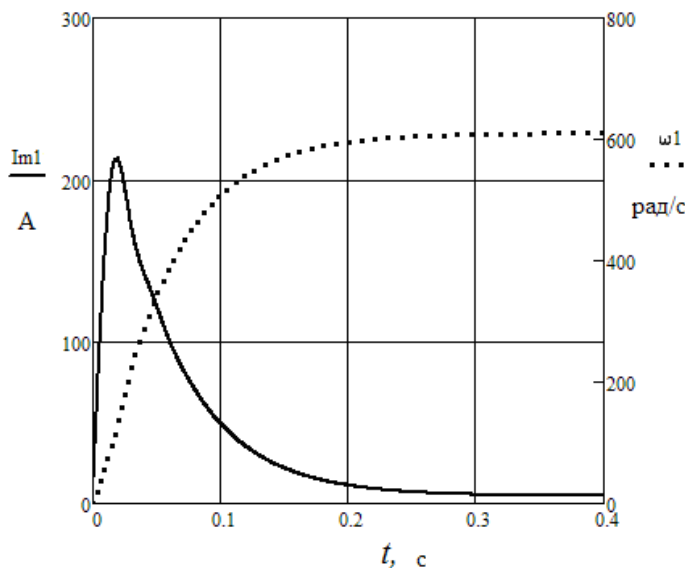


Рис. 2. Ток статора и его частота

¹ Магнитный редуктор имеет параметры: $p_1 = 2$, $z = 19$, $p_2 = z - p_1 = 17$, $D_i = 0,149$ м, $l = 0,17$ м.

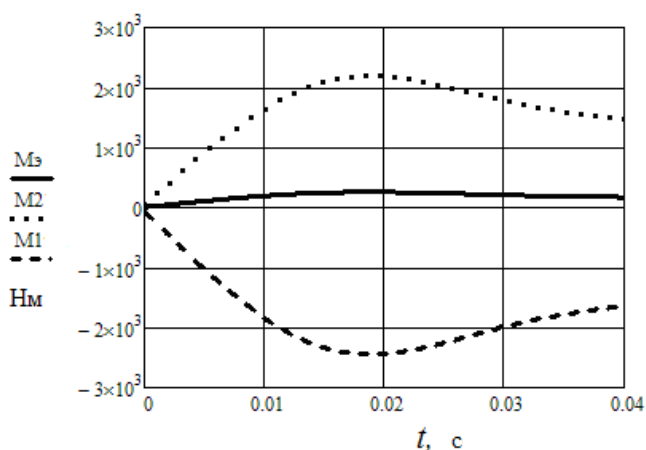


Рис. 3. Электромагнитные моменты обмотки статора и валов редуктора

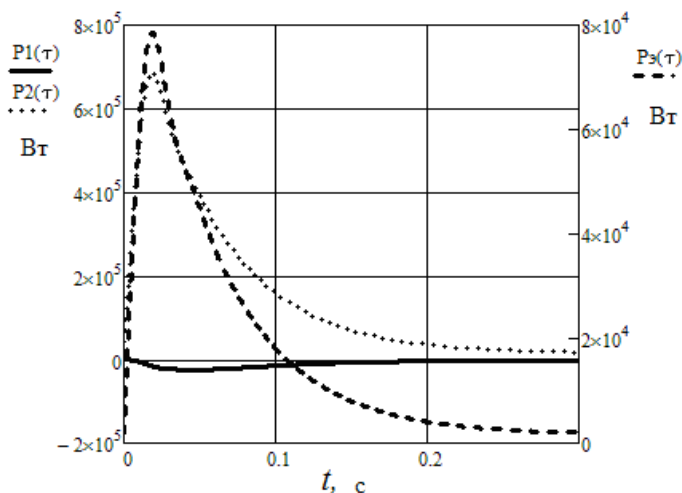


Рис. 4. Активные мощности преобразователя частоты и валов редуктора

Скорость вращения электродвигателя Ω_2 принималась постоянной, равной 314 рад/с. При напряжении звена постоянного тока ПЧ $E = 500$ В, моменте на выходном валу редуктора $M_{нр} = 50$ Нм его установившаяся скорость Ω_1 , как видно из рис. 1, составила 313 рад/с. При этом установившаяся частота ω_1 ПЧ (рис. 2) равнялась 610 рад/с ($f_1 = 97$ Гц).

Установившиеся мощности редуктора, кривые которых показаны на рис. 4, равнялись при установившемся токе $I_{m1} = 4,4$ А: $P_1 = 15,7$ кВт, $P_2 = 14,1$ кВт, $P_3 = 1,6$ кВт.

Видим, что мощность ПЧ (P_3) меньше мощности электродвигателя (P_2) в 8,8 раза.

Обмотка статора работает в двигательном режиме, передавая выходному валу дополнительную мощность.

Выводы. 1. Для существенного снижения мощности преобразователя частоты МР по сравнению с мощностью регулируемого электродвигателя необходимо число пар полюсов $p_2 = (z - p_1)$ ротора с постоянными магнитами МР выполнять достаточно большим.

В этом случае наиболее адекватна конструкция расположения магнитов в радиальных пазах, обеспечивающая концентрацию магнитного потока полюсов в воздушном зазоре.

2. Обмотка статора такого МР будет малополюсной: $p_1 = (z - p_2) = 1, 2, 3$. При изготовлении МР можно использовать статорный сердечник серийной асинхронной машины вместе с его обмоткой.

3. Частота тока статора МР представлена двумя слагаемыми, из которых первая определяется из уравнений состояния, а вторая является константой, формирующей дополнительный канал функционального воздействия. Скорости вращения валов редуктора можем регулировать, изменяя указанную константу и входное напряжение преобразователя частоты.

Литература

1. Альтиуллер М.И., Лазарев С.А. Энергоэффективные электропривода. Разработки и производства НПП «Экра» // Энергетика. 2012. № 10. С. 10–12.
2. Афанасьев А.А. Электромагнитные моменты магнитного редуктора // Электричество. 2019. № 2. С. 54–59.
3. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. 256 с.
4. Гидро-муфты фирмы «Фойт» с редуктором // Энергосберегающий привод фирмы «Фойт» для энергетики и применения: презентация [Электронный ресурс]. URL: <http://comfortgroup.com.ua/product/voith/3/2.pdf>.
5. Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок – эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях // Силовая электроника. 2007. № 3. С. 41–48.
6. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А.Я. Бернштейн, Ю.М. Гусяцкий, А.В. Кудрявцев, Р.С. Сарбатов; под. ред. Р.С. Сарбатова. М.: Энергия, 1980. 328 с.

АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (afan39@mail.ru).

Alexander A. AFANASYEV

STARTING UP AND REGULATING THE ROTATIONAL SPEED OF A POWERFUL ELECTRIC DRIVE USING A MAGNETIC REDUCING GEAR

Key words: valve machine, magnetic field position sensor, magnetic reducing gear frequency converter, electromagnetic moments, the number of pole pairs, the power of a frequency converter and an electric motor.

The article examines a magnetic reducing gear, the stator winding of which receives power in the mode of a valve machine. In the absence of this supply, the electric motor can be started-up in no-load mode. To significantly reduce the power of the magnetic reducing gear frequency converter compared to the power of the adjustable electric motor, it is necessary to make the number of the rotor's pairs of poles with permanent magnets of a

magnetic reducing gear large enough. In this case, the design of arranging the magnets in radial grooves is the most adequate, ensuring the concentration of fluxes per pole in the air gaps. The stator winding of such a magnetic reducing gear will be low-pole. When manufacturing a magnetic reducing gear, it is possible to use a stator magnetic core of a serial asynchronous machine together with its regular winding. The electromagnetic moments of the magnetic gearbox rotors are a consequence of the presence of a stator electromagnetic moment. The stator's current frequency is represented by two components, of which the first is defined from the state equations and the second is a constant forming an additional channel of functional influence. The speed of rotation of the gear shafts can be adjusted by changing the specified constant and the input voltage of the frequency converter. The equations of the magnetic reducer state describing its functional modes were solved by means of the Mathcad mathematical program.

References

1. Al'tshuller M.I., Lazarev S.A. *Energoeffektivnyye elektroprivoda. Razrabotki i proizvodstva NPP «Ekra»* [Energy-Efficient Drive Systems Are Designed and Manufactured by EKRA Ltd]. *Energetika*, 2012, no. 10, pp. 10–12.
2. Afanasyev A.A. *Elektromagnitnyye momenty magnitnogo reduktora* [Magnetic Reducing Gear's Electromagnetic Torques]. *Elektrichestvo*, 2019, no. 2, pp. 54–59.
3. Vazhnov A.I. *Perekhodnyye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transitional processes in AC machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1980, 256 p.
4. *Gidro-mufiy firmy «Foit» s reduktorom* [Foyt hydro-clutches with gearbox]. Available at: <http://comfortgroup.com.ua/product/voith/3/2.pdf>.
5. Lazarev G.B. *Chastotno-reguliruemyye elektroprivod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok – effektivnaya tekhnologiya energo- i resursosberezheniya na teplovykh elektrostantsiyakh* [Frequency-regulated electric pumping and fan installations – effective energy and resource-saving technology at thermal power plants]. *Silovaya elektronika*, 2007, no. 3, pp. 41–48.
6. Sarbatov R.S., ed.; Bernshtein A.Ya., Gusyatskii Yu.M., Kudryavtsev A.V., Sarbatov R.S. *Tiristornyye preobrazovateli chastoty v elektroprivode* [Frequency thyristor converters in electric drive]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 328 p.

ALEXANDER A. AFANASYEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (afan39@mail.ru).

Формат цитирования: Афанасьев А.А. Пуск в ход и регулирование скорости вращения мощного электропривода с помощью магнитного редуктора // Вестник Чувашского университета. – 2020. – № 3. – С. 16–23. DOI: 10.47026/1810-1909-2020-3-16-23.