

ПОТЕРИ В РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПРИ РАЗНЫХ ЗАКОНАХ УПРАВЛЕНИЯ*

Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, К.М. Виноградов,
А.Н. Горожанкин, А.Е. Бычков
г. Челябинск, ЮУрГУ

POWER LOSSES IN THE VARIABLE-SPEED ELECTRIC DRIVES AT DIFFERENT CONTROL LAWS

Y.S. Usynin, M.A. Grigoriev, A.N. Shishkov, K.M. Vinogradov,
A.N. Gorozhankin, A.E. Bychkov
Chelyabinsk, SUSU

Для электродвигателей разного типа (асинхронных, синхронных, постоянного тока, реактивных) и разными законами управления приведены обобщённые зависимости изменения соотношения составляющих потерь при изменении момента нагрузки.

Ключевые слова: электрические потери, асинхронный электропривод, синхронный электропривод, электропривод постоянного тока, электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

Power losses at load moment change for the different types of electric motors (induction, synchronous, direct current, reaction motors) and with different control laws are given.

Keywords: electric loss, induction motor, synchronous motor, direct current motor, reaction motors, electric drive with the of independent excitation synchronous reluctance machine.

Введение. Работа современного регулируемого электропривода, как правило, происходит при переменной нагрузке и с разными законами регулирования момента и скорости. Это приводит к перераспределению составляющих потерь и требует их учёта. Ниже сопоставлен характер изменения общих потерь и их составляющих в электроприводах разного типа при изменении нагрузки.

Исходные данные для анализа. В основу анализа положено наблюдение, которое заключается в том, что у двигателей, имеющих близкие значения КПД, характер изменения составляющих потерь также близок, хотя при этом абсолютные потери могут отличаться весьма значительно. Этот факт дал возможность при изменении нагрузки представить изменение составляющих потерь в относительных единицах, взяв за базовое значение суммарные потери в электродвигателе в номи-

нальном режиме. При этом внутри каждой серии электродвигателей абсолютные потери могут отличаться и весьма значительно.

Результаты расчётов. В двигателях постоянного тока, в которых номинальный КПД находится в пределах 0,8...0,95, на основании обзора нескольких десятков клиентских формуляров [1] можно предложить следующие усреднённые относительные значения составляющих потерь в номинальном режиме работы двигателя:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\sim} + \Delta P = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{коп}} + \Delta P_{\text{доб}} +$$

$$+ \Delta P_{\text{колл}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{возб}} =$$

$$= 0,25 + 0,2 + 0,05 + 0,06 + 0,25 + 0,2 + 0,1 = 1,$$

где $\Delta P_{\text{як}}$ – потери в обмотке якоря; $\Delta P_{\text{коп}}$ – потери в обмотках компенсационной и добавочных полюсов; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери; $\Delta P_{\text{колл}}$ –

*Работа проводится в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по проблеме «Энергосберегающие электроприводы на основе новых типов электрических машин и вентильных преобразователей» (госконтракт № П1442 от 03.09.2009).

потери на коллекторе; $\Delta P_{\text{стали}}$ – потери в стали; $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери на трение и вентиляцию; $\Delta P_{\text{возб}}$ – потери на возбуждение.

В тех случаях, когда двигатель постоянного тока работает в регулируемом электроприводе при неизменном токе возбуждения, переменные потери можно описать так:

$$\Delta P_{\sim} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{коп}} = 0,45 \cdot M^2,$$

т. е. считать их пропорциональными квадрату отнесительной величины момента нагрузки.

Постоянные потери

$$\Delta P = \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{колл}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{возб}} \cong \cong 0,45 = \text{Const}.$$

Зависимость суммарных потерь от момента нагрузки описывается кривой 1 на рис. 1.

В тех случаях, когда регулируемый электро-

привод работает в перемежающемся режиме S6, то с целью снижения потерь в электроприводе при нагрузках меньших номинальных снижают ток возбуждения двигателя, как правило, пропорционально току якоря. В этом случае наблюдается перераспределение потерь между составляющими:

$$\Delta P_{\sim} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{ко}} + \Delta P_{\text{возб}} + \Delta P_{\text{стали}} = 0,8 \cdot M.$$

Суммарные потери описываются кривой 1 на рис. 2.

В синхронных двигателях (СД) обзор клиентских формуляров [1] дал следующие приближённые соотношения для составляющих потерь в номинальном режиме:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{возб}} = = 0,23 + 0,25 + 0,1 + 0,2 + 0,22 = 1.$$

Здесь $\Delta P_{\text{стали}}$ – потери в стали; $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери на трение и вентиляцию; $\Delta P_{\text{як}}$ – потери в меди

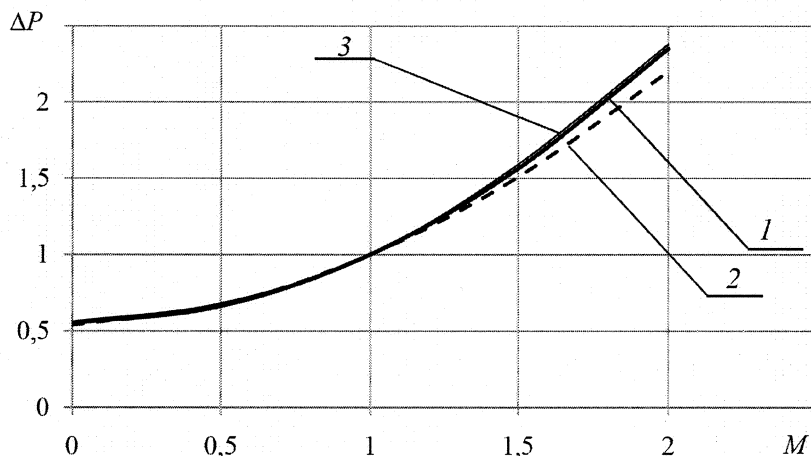


Рис. 1. Зависимость суммарных потерь от момента нагрузки: 1 – в двигателе постоянного тока при постоянном возбуждении; 2 – в СД при постоянном магнитном потоке; 3 – в асинхронном двигателе при постоянном магнитном потоке

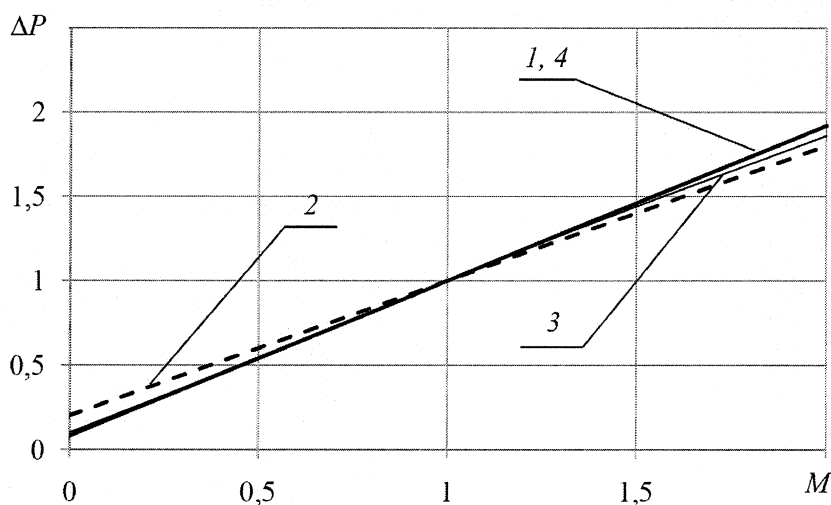


Рис. 2. Зависимость суммарных потерь от момента нагрузки: 1 – в двигателе постоянного тока при последовательном возбуждении; 2 – в СД при регулируемом возбуждении; 3 – в асинхронном двигателе при постоянном скольжении; 4 – в СРМНВ при регулируемом токе возбуждения

статора; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери; $\Delta P_{\text{возб}}$ – потери на возбуждение.

Очень эффективным по своим регулировочным характеристикам считается способ формирования момента в СД, при котором поддерживается постоянство результирующего потока, равного номинальному значению, а также ортогональность пространственных векторов МДС статора и результирующего потокосцепления [2, 3]. В этом случае достигается пропорциональность между током статора и момента, а косинус угла сдвига между векторами фазных напряжений и тока статора СД равен единице.

В ранних схемах векторного регулирования [2] формирование момента осуществлялось воздействием на величины токов статора, ротора и пространственный угол между МДС, создаваемыми этими токами. В более поздних разработках, в частности, фирма АББ [4] предпочитает формировать момент воздействием на величины результирующего потока (точнее – его оценки) и тока статора при ортогональности между этими пространственными векторами.

При описанном законе формирования момента составляющие потерь в меди статора:

$$\Delta P_{\text{як}} = 0,25 \cdot M^2.$$

Потери на возбуждение ротора также следует отнести к переменным, так как ток возбуждения (в долях от номинального значения) регулируется, подчиняясь закону:

$$I_{\text{в}} = \sqrt{1 + I_{\text{с}}^2},$$

где $I_{\text{с}}$ – относительное (в долях от номинального) значение тока статора.

Постоянные потери в этом случае:

$$\Delta P_{\text{пост}} \approx \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{стали}} \approx 0,43 = \text{const}.$$

Зависимость суммарных потерь в СД описывается кривой 2 на рис. 1.

Чтобы снизить потери в СД при нагрузках менее номинального значения, обычно снижают ток возбуждения пропорционально току статора [5].

В этом случае переменные потери:

$$\Delta P_{\sim} = \Delta P_{\text{як}} + \Delta P_{\text{возб}} + \Delta P_{\text{стали}} \approx 0,8 \cdot M,$$

а к постоянным потерям следует отнести лишь механические потери:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{тр}} = 0,2 = \text{const}.$$

График суммарных потерь в этом случае соответствует кривой 2 на рис. 2.

Распределение составляющих потерь в асинхронных электроприводах принималось таким же, как предлагалось фирмой АББ для асинхронных двигателей повышенной энергоэффективности [6].

Здесь

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{тр}} = \\ &= 0,34 + 0,18 + 0,24 + 0,14 + 0,1 = 1. \end{aligned}$$

В приведенном выражении $\Delta P_{\text{я}}$ – потери в

меди статора; $\Delta P_{\text{стали}}$ – потери в стали; $\Delta P_{\text{рот}}$ – потери в роторе; $\Delta P_{\text{доб}}$ – добавочные потери; $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери на трение и вентиляцию.

Когда регулирование момента производят при постоянном магнитном потоке двигателя, то к переменным потерям следует отнести потери в меди статора $\Delta P_{\text{я}} = 0,34 \cdot I_1^2$ и $\Delta P_{\text{рот}} = 0,24 \cdot I_2^2$ ротора, где I_1 и I_2 – токи статора и ротора в долях от их номинальных значений.

Постоянные потери могут быть приняты равными:

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{тр}} \approx 0,43 = \text{const}.$$

Суммарные потери при изменении момента нагрузки для асинхронного двигателя, имеющего в номинальном режиме соотношение токов статора $I_1 = 1$, ротора $I_2 = 0,8$, и намагничивания $I_{\mu} = 0,6$, описываются кривой 3 на рис. 1.

Когда регулирование асинхронного электропривода ведётся с минимумом потерь, то можно принять, что при изменении момента скольжение в двигателе оставляют неизменным, а токи статора, ротора и намагничивания изменяют в равных пропорциях [7]. В этом случае переменными потерями следует считать:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\sim} &= \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{стали}} = \\ &= 0,34 \cdot I_1^2 + 0,24 \cdot I_2^2 + 0,18 I_{\mu}^2. \end{aligned}$$

Здесь I_1, I_2, I_{μ} – токи статора, ротора и намагничивания в долях от их значений в номинальном режиме двигателя. Постоянные потери

$$\Delta P_{\text{пост}} = \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{мех}} \approx 0,24 = \text{const}.$$

График суммарных потерь характеризуется кривой 3 на рис. 2.

Высокими энергетическими и удельными показателями характеризуется электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения (СРМНВ) [8], по западной терминологии – Field Regulated Reluctance Machine (FRRM) [9]. Поскольку авторы не располагали готовой информацией о составляющих потерь в этих электродвигателях, то был выполнен электромагнитный расчёт СРМНВ со следующими паспортными данными: $P_{\text{н}} = 23,5$ кВт, $n_{\text{н}} = 1500$ об/мин, $U_{\text{н}} = 150$ В, $I_{\text{фазы}} = 50$ А, $\eta_{\text{н}} = 91\%$. Этот расчёт дал следующие соотношения составляющих потерь

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{стали}} + \Delta P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{тр}} = \\ &= 0,67 + 0,25 + 0,03 + 0,05 = 1. \end{aligned}$$

В приведенном выражении $\Delta P_{\text{я}}$ – потери в меди статора; $\Delta P_{\text{стали}}$ – потери в стали; $\Delta P_{\text{рот}}$ – потери в роторе; $\Delta P_{\text{тр}}$ – потери на трение и вентиляцию.

Как правило, в СРМНВ токи якоря и возбуждения регулируют пропорционально друг другу [8], тогда составляющие $\Delta P_{\text{я}}$ и $\Delta P_{\text{стали}}$ следует

отнести к переменным потерям, а $\Delta P_{\text{рот}}$ и $\Delta P_{\text{тр}}$ – к постоянным. В результате общая зависимость потерь:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\sim} + \Delta P = 0,82 \cdot M + 0,18.$$

Кривая 4 на рис. 2 соответствует этому случаю.

Обсуждение результатов. Двигатели общепромышленного исполнения, имеющие номинальный КПД в пределах $\eta_n = 0,8...0,95$, независимо от типа (синхронные, асинхронные, постоянного тока, реактивные) при изменении момента нагрузки имеют практически совпадающий характер изменения относительных значений постоянных и переменных составляющих потерь.

При регулировании скорости и(или) момента в электроприводах с поддержанием постоянства магнитного потока двигателя обобщенная зависимость суммарных потерь в долях от их значения в номинальном режиме двигателя может быть описана уравнением

$$\Delta P_{\Sigma} = 0,57 + 0,43 \cdot M^2,$$

а в электроприводах, где ток возбуждения изменяют пропорционально току якоря:

$$\Delta P_{\Sigma} = 0,1 + 0,9 \cdot M.$$

Когда момент нагрузки близок к номинальному значению или не отличается от него в ту или иную сторону более чем на 50 %, то, как это следует из сопоставления кривых на рис. 1 и 2, суммарные потери при обоих способах регулирования магнитного потока отличаются незначительно. Заметная выгода при работе с регулируемым магнитным потоком наблюдается в зоне малых нагрузок, когда момент нагрузки $M \leq 0,5 \cdot M_n$. Работу в зоне больших моментов при $M \geq 1,5 \cdot M_n$ также выгоднее выполнять при регулируемом магнитном потоке, но на практике это не всегда удаётся из-за возможного насыщения магнитной системы электродвигателя. Тогда приходится переходить на двухзонное регулирование скорости или момента [3, 7].

Литература

1. Альбом технических данных индивидуальных электрических машин для приводов прокатных станов: вторая редакция / под ред. А.И. Шейнмана. – М.: ГПИ «Тяжпромэлектроиздат», 1968. – 363 с.
2. Stemmer, H. Antriebssystem und elektronische Regeleinrichtung der getriebelosen Rohrmühle / H. Stemmer // Brown Boveri Mitt. – 1970. – Bd 57. – №3. – S. 121–129.
3. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
4. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
5. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод / А.М. Вейнгер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 224 с.
6. Тиммер, Р. Эффективность электрического двигателя / Р. Тиммер, М. Хелинко, Р. Эскола // АББ Ревю. Энергоэффективность. – 2007. – № 2. – С. 81–84.
7. Усынин, Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
8. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – № 3. – 2007. – С. 21–26.
9. Law, J.D. Design and Performance of Field Regulated Reluctance Machine / J.D. Law, A. Chertok, T.A. Lipo // IEEE Trans. on Industry Applications. – 1994. – № 5. – P. 1185–1193.

Поступила в редакцию 8.01.2010 г.

Усынин Юрий Семёнович – доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промстанков Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – общепромышленный электропривод, дифференциальные электроприводы, электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

Usynin Yuri Semyonovich is Dr. Sc. (Engineering), Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: general industrial electric drive, differential drivers, electric drives with new types of electrical machines. Tel.: +7 (351) 267-93-21.

Григорьев Максим Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промстанков Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 223-67-13.

Grigoriev Maxim Anatolievich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines. Tel.: +7 (351) 223-67-13.

Шишков Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промустановок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин, электроприводы с параметрическим регулированием. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

Shishkov Alexandr Nikolaevich is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines, electric drives with parametric control. Tel.: +7 (351) 267-93-21.

Виноградов Константин Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промустановок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – генераторы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

Vinogradov Konstantin Mikhailovich is Cand. Sc (Engineering), Associate Professor of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: generators with new types of electrical machines. Tel.: +7 (351) 267-93-21.

Горожанкин Алексей Николаевич – аспирант кафедры электропривода и автоматизации промустановок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

Gorozhankin Alexey Nikolaevich is a post-graduate student of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines. Phone: +7 (351) 267-93-21.

Бычков Антон Евгеньевич – студент кафедры электропривода и автоматизации промустановок Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. Область научных интересов – электроприводы с новыми типами электрических машин. Контактный телефон: +7 (351) 267-93-21.

Bychkov Anton Eugenievich is a student of the Electric Drive and Production Units Automation Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: electric drives with new types of electrical machines. Phone: +7 (351) 267-93-21.