

## СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

Маткасимов М

ассистент кафедры «Электротехники, электромеханики и электротехнологий»

Андижанского машиностроительного института

**Аннотация:** В настоящей статье рассмотрены вопросы снижения потерь мощности и энергии в электроприводах, подробно изложены причины вызывающие потери, влияние потерь на энергетические показатели электроприводов. В статье приводятся пути снижения потерь, особенно в переходных процессах, в частности при пуске, реверсе и торможении электропривода. А также дан анализ характера потерь при работе привода под нагрузкой и возможные способы их уменьшения. Также в статье предложены способы снижения потерь в системе «Тиристорный преобразователь – двигатель».

**Ключевые слова и выражения:** Потери мощности; потери энергии; переходной процесс; постоянные и переменные потери; пуск, реверс и торможение ЭП; многоскоростной асинхронный двигатель; число пар полюсов; ТП-тиристорный преобразователь; момент инерции; управляемый выпрямитель.

Потери мощности и энергии возникающие при пуске, реверсе, торможении, изменении скорости и изменении нагрузки, как правило, превышают их допустимые значения. По этой причине выделяющиеся в двигателе и других элементах электропривода (ЭП) потери могут быть весьма значительными и существенно влиять на энергетические показатели его работы. Повышенные потери в двигателе вызывают его дополнительный нагрев, что снижает его энергетические показатели. Особенно большое значение определение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет для ЭП, у которых динамический режим является основным. К ним относятся, например, ЭП прокатных станов, подъемных кранов, строгальных станков, лифтов и др.

В общем случае потери энергии за время переходного процесса  $t_n$  могут быть определены с помощью следующего выражения

$$\Delta A = \int_0^{t_n} \Delta P dt = \int_0^{t_n} K dt + \int_0^{t_n} V dt = \Delta A_K + \Delta A_V; \quad (1)$$

где,  $\Delta A_K$  – потери энергии, обусловленные постоянными потерями мощности,  $\Delta A_V$  – потери энергии, обусловленные переменными потерями мощности.

Потери энергии  $\Delta A_K$  легко можно найти в том случае, когда постоянные потери мощности  $K$  не изменяются за время переходного процесса, т.е.

$$\Delta A_K = K t_n; \quad (2)$$

Потери энергии  $\Delta A_V$ , выражающие переменные потери мощности через ток и сопротивление можно определить по формуле

$$\Delta A_V = \int_0^{t_n} i^2(t) R dt; \quad (3)$$

Использование выражения (3) для определения  $\Delta A_V$  во многих случаях оказывается затруднительным из-за того, что при этом необходимо знать закон изменения тока двигателя в переходном процессе  $i(t)$ , а также располагать данными об изменении сопротивления  $R$ . Так как часто зависимость не выражается аналитически, а в переходных процессах  $R$  изменяется, то точное вычисление интеграла (3) оказывается затруднительным. Более удобные расчетные соотношения для определения потерь энергии в переходных процессах получаются в том случае, если переменные потери мощности выражаются через механические переменные и параметры.

Потери энергии при работе ЭП без нагрузки ( $M_c = 0$ ). Потери мощности в якоре ДПТ и роторе АД определяются по одной формуле (1) и поэтому переменные потери энергии в этих частях двигателей также определяются идентично:

$$\Delta A_{V0} = \Delta A_{20} = \int_0^{t_{n,n}} M \omega_0 s dt = \int_0^{t_{n,n}} M (\omega_0 - \omega) dt, \quad (4)$$

где,  $s = \delta = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  - скольжение или относительная скорость двигателей.

Исключим из (4) время как переменную, воспользовавшись для этого уравнением механического движения, при  $M_c = 0$  получим

$$dt = J \frac{d\omega}{M} = - \frac{J \omega_0 ds}{M}; \quad (5)$$

Заменим в (4)  $dt$  и изменив одновременно пределы интегрирования, получим

$$\Delta A_{20} = \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} M \omega_0 s \left( - \frac{J \omega_0 ds}{M} \right) = - \frac{J \omega_0^2 \int_{s_{нач}}^{s_{кон}} s ds}{2} = \frac{J \omega_0^2 (s_{нач}^2 - s_{кон}^2)}{2}; \quad (6)$$

Полученное выражение (6) удобно для определения потерь энергии, так как при его использовании не требуется знать зависимость изменения координат ЭП во времени, а необходимо лишь иметь значения  $s_{нач}$  и  $s_{кон}$ .

Определим потери энергии в якоре ДПТ и роторе АД при их пуске, реверсе и торможении вхолостую. При пуске двигателей

$$\omega_{нач} = 0 \text{ и } \omega_{кон} = \omega_0;$$

$$s_{нач} = 1 \text{ и } s_{кон} = 0.$$

поэтому в соответствии с чем

$$\Delta A_{20}^n = \frac{J \omega_0^2}{2}; \quad (7)$$

Интересно отметить, что в соответствии с (7) численно потери энергии равны кинетической энергии, которая будет запасена к концу пуска в движущихся механических частях ЭП.

Поэтому динамическом торможении потери энергии, поскольку  $s_{нач} = 1$  и  $s_{кон} = 0$ .

также определяются выражением (7), т.е.

$$\Delta A_{20}^{\text{п}} = \Delta A_{20}^{\text{т}} = \frac{J\omega_0^2}{2};$$

. В этом режиме весь запас кинетической энергии в ЭП превращается в потери энергии, выделяемые в виде тепла.

При торможении противовключением  $s_{\text{нач}} = 2$ ,  $s_{\text{кон}} = 1$ , а потери энергии

$$\Delta A_{20}^{\text{т}} = \frac{3J\omega_0^2}{2}; \quad (8)$$

т.е. они равны тройному запасу кинетической энергии ЭП. Следовательно, потери энергии при торможении противовключением существенно (в 3 раза) превышают потери при динамическом торможении.

При реверсе  $s_{\text{м4}} = 2$ ,  $s_{\text{коп}} = 0$  и потери энергии

$$\Delta A_{20}^{\text{т}} = \frac{4J\omega_0^2}{2}; \quad (9)$$

т.е. они равны сумме потерь при торможении противовключением и пуске.

Для определения полных переменных потерь энергии в АД необходимо найти еще потери в цепи статора. Для этого воспользуемся выражением (8.12), из которого следует, что

$$\Delta A_{10} = \frac{\Delta A_{20} R_1}{R_2}; \quad (10)$$

Тогда полные потери энергии в АД

$$\Delta A_{\text{в0}} = \Delta A_{10} + \Delta A_{20} = \frac{J\omega_0^2 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2)}{2}; \quad (11)$$

Отметим, что потери энергии в роторе АД не зависят от его сопротивления, в то время как потери в статоре АД обратно пропорциональны его сопротивлению.

Потери энергии в системе «преобразователь - двигатель». Положительным свойством системы П-Д является возможность существенного сокращения потерь энергии в переходных процессах. Это достигается путем плавного изменения в переходных процессах с помощью управляемого выпрямителя напряжения для ДПТ и с помощью преобразователя частоты - частоты напряжения для АД, в результате чего происходит постепенное изменение и задаваемой ими скорости идеального холостого хода двигателей. При этом разность между скоростью холостого хода и скоростью якоря или ротора оказывается меньшей, чем при скачкообразном изменении напряжения или частоты, что и ведет к сокращению потерь в двигателе. В пределе, когда  $M_c = 0$  и скорость  $\omega_0$  изменяется бесконечно медленно, отдаваемая источником энергия идет только на сообщение двигателю кинетической энергии, а потери ее отсутствуют.

Уменьшение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет важное значение, поскольку позволяет улучшить энергетические показатели работы ЭП. Различают два основных способа снижения потерь электроэнергии в переходных процессах: уменьшение момента инерции ЭП  $J$  и регулирование в переходных процессах скорости идеального холостого хода двигателей  $\omega_0$ .

Уменьшение момента инерции ЭП возможно за счет снижения момента инерции применяемых электродвигателей, т. е. за счет использования малоинерционных двигателей, имеющих пониженный момент инерции якоря (двигатели с повышенным отношением длины якоря к его диаметру, с полым или дисковым якорем); рационального конструирования механической передачи (выбора оптимального передаточного числа редуктора, рациональных размеров и форм элементов механической передачи); замены одного двигателя двумя, имеющими его половинную номинальную мощность. Расчеты показывают, что суммарный момент инерции двух двигателей половинной мощности оказывается меньше момента инерции одного двигателя полной мощности. Например, два двигателя типа 4АН200 мощностью по 45 кВт имеют суммарный момент инерции  $2 \cdot 1,38 = 2,76 \text{ кгм}^2$ . Двигатель 4АН250 мощностью 90 кВт, рассчитанный на ту же скорость, имеет момент инерции  $3,53 \text{ кг-м}^2$ , т.е. почти на 30% больше.

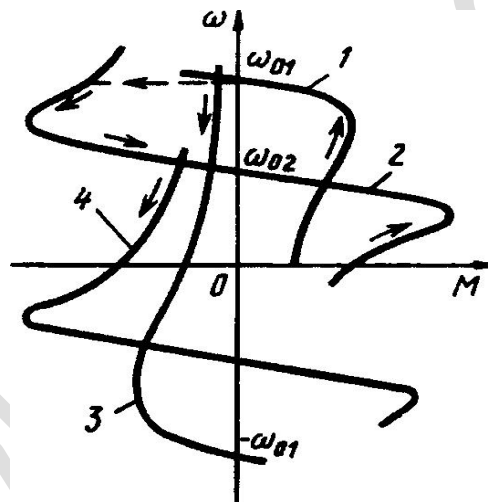


Рис.1. Механические характеристики асинхронного двигателя.

Регулирование скорости идеального холостого хода двигателей постоянного тока обеспечивается изменением напряжения на якоре в системе «управляемый выпрямитель - двигатель», а АД - изменением частоты питающего напряжения в системе «преобразователь частоты - АД» или числа пар полюсов в многоскоростном АД. Остановимся на снижении потерь в ЭП с многоскоростным АД.

В качестве примера рассчитаем потери электроэнергии в роторе двухскоростного АД при разбеге его до высокой скорости (характеристика 1) и торможении с высокой скорости при отсутствии нагрузки с помощью механических характеристик, приведенных на рис. 1.

Пуск АД возможен двумя способами: включением обмотки статора сразу на число пар полюсов  $p_x$  (прямой пуск, характеристика 1) или включением обмотки статора сначала на число пар полюсов  $p_2 = 2p_x$  (характеристика 2), а затем переключением обмотки статора на число пар полюсов  $p_x$  (ступенчатый пуск).

Потери энергии в роторе АД при прямом пуске (характеристике 1)

$$\Delta A_{2п} = \frac{J\omega_{01}^2}{2};$$

Потери энергии при ступенчатом пуске при разбеге АД по характеристике 2 (первая ступень пуска)

$$\Delta A_{2c1} = \frac{J\omega_{02}^2}{2} = \frac{J\omega_{01}^2}{8};$$

а при разбеге АД по характеристике 1 (вторая ступень пуска)

$$\Delta A_{2c2} = \frac{J\omega_{01}^2}{8};$$

Суммарные потери при ступенчатом пуске

$$\Delta A_{2c} = \Delta A_{2c1} + \Delta A_{2c2} = \frac{J\omega_{01}^2}{4};$$

Сопоставление показывает, что при ступенчатом пуске произошло снижение потерь электроэнергии в два раза по сравнению с прямым пуском. Таким образом, за счет изменения в переходном процессе скорости холостого хода происходит снижение потерь энергии в роторе, которое определяет снижение потерь в статоре и полных потерь в АД. В общем случае, если скорость идеального холостого хода в переходном процессе имеет  $n$  ступеней регулирования, потери энергии в роторе уменьшаются в  $n$  раз

$$\Delta A_2 = \frac{J\omega_{0n}^2}{2n}.$$

Сокращаются потери в многоскоростном АД и при ступенчатом торможении с высокой скорости. При торможении противовключением в одну ступень двигатель с характеристики 4 переходит на работу по характеристике 3, соответствующей тому же числу пар полюсов двигателя  $p_v$  но при измененном порядке чередования фаз напряжения на статоре. Потери энергии в роторе за время торможения до нулевой скорости

$$\Delta A_2 = \frac{3J\omega_{01}^2}{2};$$

При ступенчатом торможении путем изменения числа пар полюсов с  $p_x$  на  $p_2 = 2p_x$  АД сначала переходит на работу по характеристике 2, при которой он тормозится до скорости  $\omega_{02}$  с отдачей энергии в сеть. Потери энергии на этом этапе (при  $s = -1, s = 0$ )

$$\Delta A_{2c1} = \frac{J\omega_{02}^2}{2} = \frac{J\omega_{01}^2}{8};$$

На следующем этапе путем изменения чередования фаз при том же числе пар полюсов осуществляется торможение противовключением (характеристика 4), потери при котором (при  $s_{нач} = 2, s_{кон} = 1$ )

$$\Delta A_{2c2} = \frac{3J\omega_{02}^2}{2} = \frac{3J\omega_{01}^2}{8};$$

Суммарные потери при ступенчатом торможении

$$\Delta A_{2c} = \Delta A_{2c1} + \Delta A_{2c2} = \frac{J\omega_{01}^2}{2}.$$

Таким образом при ступенчатом торможении потери сокращаются вдвое. Анализ показывает, что потери мощности и энергии в электроприводах можно снизить путём применения оптимальных способов пуска, торможения и реверса для конкретного типа ЭП.

### Использованная литература:

1. A.A. Khashimov, I.K. Pampias, Energy saving Solid State Drives. Asynchronous Motors for Technological Machines and Installations; ISBN 978-960-93-3063-3, Athens, 2011
2. Abdullaev, M., Matqosimov, M., & Karimjonov, D. (2020). Chiziqli motorlarni elektr haydovchilarda qo'llash. Universum: Muhandislik fanlari , (11-5 (80)), 12-14.
3. Pirmatov, N., Mahamadjonov, S., Matqosimov, M., & Haydarov, H. (2024). Characteristics of the static and dynamic operating modes of the asynchronous generator in renewable energy sources and the production of electric energy control through a frequency converter. In E3S Web of Conferences (Vol. 480, p. 01007). EDP Sciences.
4. Berdiyovich, P. N., Mahamadhoshim o'g'li, M. M., & Sodiqjon Yo'ldashboy o'g, M. (2023). Research on the use of asynchronous machine in generator mode in microhydroelectric plants of a renewable alternative energy source device.
5. Abdullaev, M., Axmadaliyev, U., & Matqosimov, M. (2020). Energiya tejankor va energiya tejaydigan elektr drayverlarni qo'llash. Zamonaviy tadqiqotlar va innovatsiyalar , (6), 13-13. APA
6. Zokirova, I. Z., & Matqoshimov, M. (2019). Dielektriklarning elektr o'tkazishi. Iqtisodiyot va jamiyat , (10 (65)), 178-182.
7. Abdullaev, M., Axmadaliyev, U. A., Matqosimov, M. M. H. U., & Xaydarov, X. M. U. (2020). Energiya tejaydiyot texnologiyalardan foydalanish araka sanoat quvvatli ishlab chiqarishni oshirish. Universum: Muhandislik fanlari , (11-5 (80)), 8-11.
8. Yuldashev B. R. MOTOR PROTECTION ANALYSIS //«ОБРАЗОВАНИЕ И НАУКА В XXI ВЕКЕ». – 2023.
9. Абдихошимов, М. (2024). ДОСТИЖЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В КРАНОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ. ОБРАЗОВАНИЕ НАУКА И ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МИРЕ, 36(5), 138-140.
10. Абдихошимов, М. (2023). ВЫБОР СИЛОВОЙ СХЕМЫ КРАНОВОГО ТПН. Лучшие интеллектуальные исследования, 11(5), 99-102.
11. Uktamovich, A. S. (2024). НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ. International journal of scientific researchers (IJSR) INDEXING, 4(1), 338-341.
12. Абдурахмонов, С. У., & Азизов, Б. Ё. СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИННОВАЦИИ. СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИННОВАЦИИ Учредители: Международный научно-инновационный центр, (10).
13. Исмаилов, А. И., Тухтамишев, Б. К., & Азизов, Б. Я. (2014). Актуальные вопросы энергетики АПК Андижанской области Узбекистана. Российский электронный научный журнал, (7), 13-18.
14. Yenikeev, A. A., & Teshaboyev, R. I. O. G. (2021). Ip yiguruv qurilmalarida energiya sarfi va o'lchash vositlari. Science and Education, 2(5), 319-322.

15. Teshaboyev, R. I. O. G., & O'Tanov, A. A. O. G. (2021). ENERGIYA SAMARALI BOSHQARILUVCHI O'ZGARMAS TOK O'ZGARTGICHLAR VA ULARNING AVFZALLIKLARI. *Science and Education*, 2(3), 119-122.
16. Ходжиматов, М. Б. (2023). ВЫБОР ПОВЕРХНОСТИ СЕЧЕНИЯ СЕТЕВОГО ПРОВОДНИКА ПО ДОПУСТИМОМУ РАССЕЙЯНИЮ НАПРЯЖЕНИЯ. *ОБРАЗОВАНИЕ НАУКА И ИННОВАЦИОННЫЕ ИДЕИ В МИРЕ*, 35(5), 52-56.
17. Khodjimatom, M. B. (2023). THE PRINCIPLE OF OPERATION OF AUTOMATED LATHES. *International journal of scientific researchers (IJSR) INDEXING*, 3(2).
18. Абдухалилов, Д. К. КАЧЕСТВЕННАЯ ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ. *СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИННОВАЦИИ Учредители: Международный научно-инновационный центр*, (5).
19. Zakrullayevna, Z. I., Ahmadaliyevich, M. M., Ugli, M. S. S., & Rahimjon, U. (2022). ELECTRIC DOWNLOAD DIAGRAMS AND SELECTION OF ELECTRIC ENGINE POWER. *European International Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies*, 2(04), 33-37.
20. Мамаджанов, Б. Д., Шукуралиев, А. Ш., & Манноббоев, Ш. С. (2023). МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ РАБОЧЕГО ОРГАНА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОРТИРОВОЧНОЙ МАШИНЫ. *Educational Research in Universal Sciences*, 2(15), 581-589.