

## ЗАВИСИМОСТИ МОМЕНТА, ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И КПД ИНДУКЦИОННОЙ ЯВНОПОЛЮСНОЙ МУФТЫ СКОЛЬЖЕНИЯ С ТРЕМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ОТ АКТИВНОЙ ДЛИНЫ ЯКОРЯ

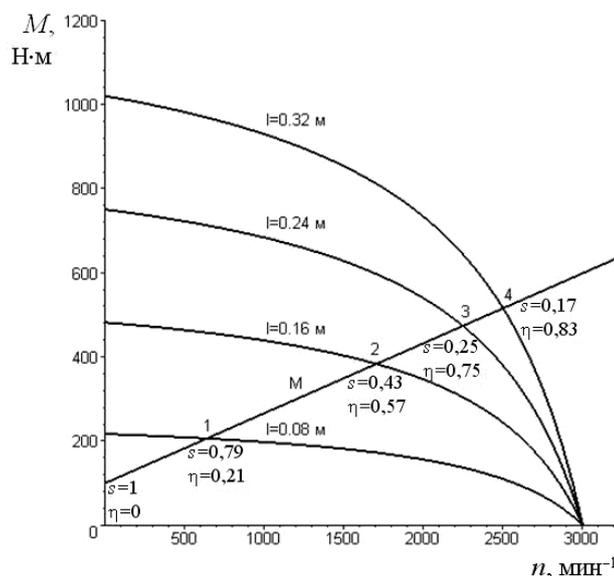
*Д.В. Харитонов*

Самарский государственный технический университет, филиал в г. Сызрань  
446001, г. Сызрань, Самарская область, ул. Советская, д. 45

*Получены зависимости момента на ведомом валу, а также частоты вращения и КПД индукционной явнополюсной муфты скольжения с тремя степенями свободы от активной длины якоря для нагрузок различных видов при одинаковой номинальной частоте вращения.*

**Ключевые слова:** индукционная муфта, муфта скольжения, степени свободы, регулирование муфты, активная длина якоря, вариатор частоты, вариатор момента, механические характеристики, КПД муфты.

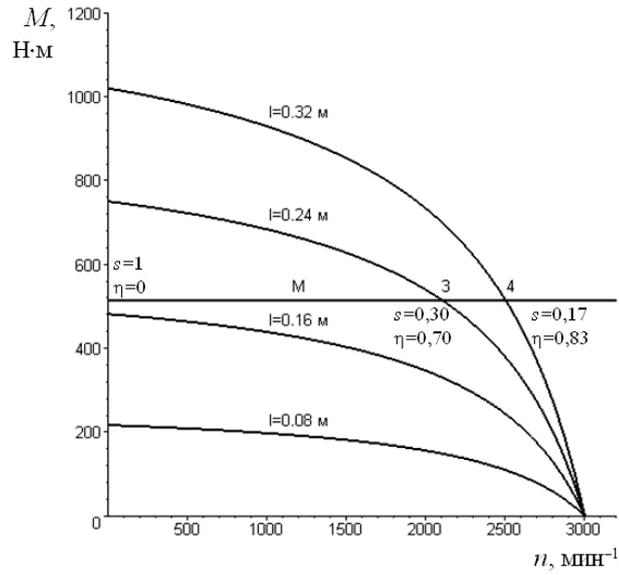
В статье [1] рассмотрена работа индукционной явнополюсной муфты скольжения с тремя степенями свободы [2] как вариатора частоты. Данная муфта регулируется изменением активной длины якоря посредством перемещения якоря относительно индуктора вдоль ведомого вала. Однако работа ее как вариатора момента рассмотрена неполно, т. к. момент муфты зависит не только от активной длины якоря, но и от скольжения (см. формулу (1)). Скольжение же при изменении активной длины изменяется, причем по-разному для различных нагрузок (рис. 1). В данной работе рассматривается работа такой муфты как вариатора момента для нагрузок различных видов.



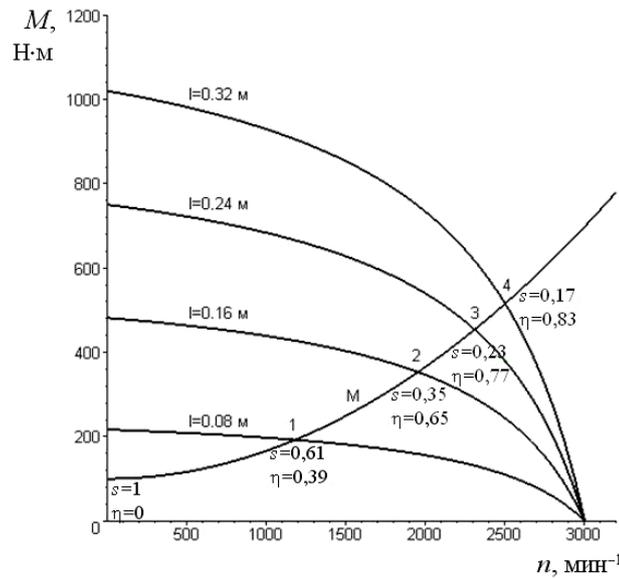
*a*

---

*Дмитрий Вячеславович Харитонов – преподаватель.*



б



в

Р и с . 1. Механические характеристики индукционной явнополусной муфты скольжения с тремя степенями свободы и нагрузки:

*a* – для нагрузки с линейно возрастающим моментом ( $q=1$ )

при  $M_c=100$  Н·м,  $M_n=515,5$  Н·м;

*б* – для нагрузки с постоянным моментом ( $q=0$ )

при  $M_c=M_n=515,5$  Н·м;

*в* – для нагрузки, задаваемой квадратичной функцией ( $q=2$ ),

при  $M_c=100$  Н·м,  $M_n=515,5$  Н·м.

Общие параметры:  $n_0=3000$  мин<sup>-1</sup>;  $n_n=2500$  мин<sup>-1</sup>;  $D=0,32$  м;

$\rho=0,16 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $B_{m0}=0,623$  Тл;  $\mu_{ая}=0,458 \cdot 10^{-3}$  Гн/м;  $z=16$

Уравнение вращающего момента индукционной муфты [3, с. 56]:

$$M = \frac{\pi^2}{680} \frac{B_{m0}^2 D^3 l n_0 s}{\left(1 + \frac{D}{z l_z}\right) \left(\frac{4}{D} \rho z + \frac{\pi D}{12} \frac{z}{z-2} \mu_{\dot{a}\ddot{y}} n_0 s \cdot 10^{-3}\right)}, \quad (1)$$

или

$$M = \frac{\pi^2}{680} \frac{B_{m0}^2 D^3 l (n_0 - n)}{\left(1 + \frac{D}{z l_z}\right) \left(\frac{4}{D} \rho z + \frac{\pi D}{12} \frac{z}{z-2} \mu_{\dot{a}\ddot{y}} (n_0 - n) \cdot 10^{-3}\right)}, \quad (1^*)$$

где  $B_{m0}$  – амплитуда первой гармоники переменной составляющей индукции магнитного поля в зазоре при  $s=0$ , т. е. без учета влияния реакции якоря на  $B_m$ ;  $D$  – активный диаметр якоря;  $l$  – активная длина якоря, для явнополюсной муфты активная длина якоря равна длине зубцов (полюсов)  $l=l_z$ ;  $n_0$  – частота вращения (об/мин) ведущей части муфты;  $s=(n_0-n)/n_0$  – скольжение муфты,  $n$  – частота вращения (об/мин) ведомой части муфты,  $n_0-n=n_0s$  – относительная частота вращения ведущего и ведомого валов;  $z$  – количество зубцов (полюсов);  $l_z$  – длина зубцов (полюсов) индуктора;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала якоря;  $\mu_{\dot{a}\ddot{y}}$  – абсолютная магнитная проницаемость материала якоря на его поверхности при  $s=0$ .

Уравнение нагрузки в общем виде может быть описано зависимостью [3, с. 101]

$$M = M_c + (M_i - M_c) \left(\frac{n}{n_i}\right)^q, \quad (2)$$

где  $M$  – текущее значение момента нагрузки;  $M_c$  – постоянная составляющая момента нагрузки;  $M_n$  – момент нагрузки при номинальной частоте вращения;  $n$  – текущее значение частоты вращения;  $n_n$  – номинальная частота вращения нагрузки;  $q$  – показатель степени, зависящий от вида нагрузки. Уравнение (2) является приближением реальных нагрузочных характеристик и не учитывает переходные процессы при пуске привода.

**Механические характеристики муфты и нагрузки.** На рис. 1 показаны механические характеристики индукционной явнополюсной муфты скольжения с тремя степенями свободы, построенные по (1\*) при разной активной длине  $l$  якоря, и механические характеристики различных видов нагрузки, построенные по уравнению (2) при  $q=0, 1, 2$  (т. е. в приближении, задаваемом уравнением (2)). Подобные механические характеристики обычной индукционной муфты скольжения при различных токах возбуждения и механические характеристики нагрузок приводятся в [3, с. 102, рис. 6.1].

**Зависимости частоты вращения и КПД муфты от активной длины якоря.** Зависимость  $n(l)$  частоты вращения ведомого вала индукционной явнополюсной муфты с тремя степенями свободы от активной длины якоря была построена в [1, рис. 4]. Так как КПД любой индукционной муфты без учета добавочных потерь оп-

ределяется по формуле  $\eta = \frac{n}{n_0}$ , то зависимость  $\eta(l)$  КПД муфты от активной длины

якоря является зависимостью частоты вращения от активной длины (рис. 2), уменьшенной в  $n_0$  раз (рис. 3).

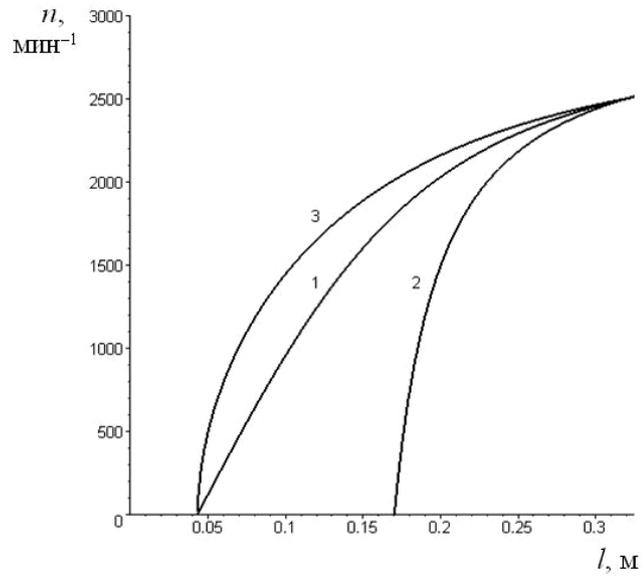


Рис. 2. Зависимость  $n(l)$  частоты вращения ведомого вала индукционной муфты с тремя степенями свободы от активной длины якоря:

- 1 – для нагрузки с линейно возрастающим моментом при  $M_c=100$  Н·м,  $M_n=515,5$  Н·м;
  - 2 – для нагрузки с постоянным моментом при  $M_c=M_n=515,5$  Н·м;
  - 3 – для нагрузки, задаваемой квадратичной функцией, при  $M_c=100$  Н·м,  $M_n=515,5$  Н·м.
- Общие параметры:  $n_0=3000$  мин<sup>-1</sup>;  $n_n=2500$  мин<sup>-1</sup>;  
 $D=0,32$  м;  $\rho=0,16 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $B_{m0}=0,623$  Тл;  $\mu_{дв}=0,458 \cdot 10^{-3}$  Гн/м;  $z=16$

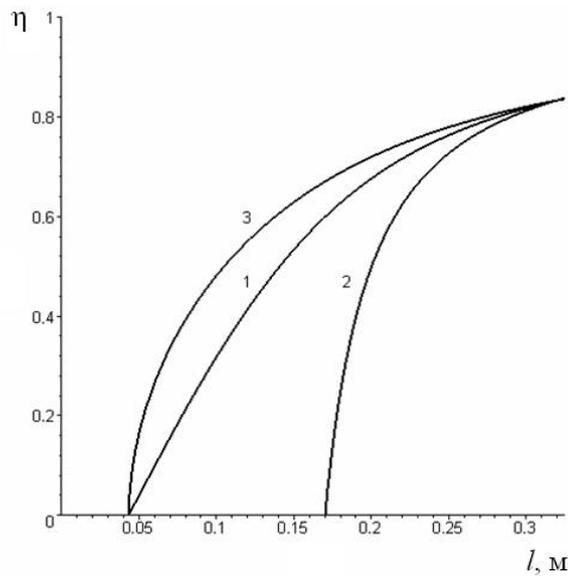


Рис. 3. Зависимость  $\eta(l)$  КПД индукционной муфты с тремя степенями свободы от активной длины якоря (все обозначения и параметры муфты и нагрузки – как на рис. 2)

Для сравнения КПД муфты при разных нагрузках нужно иметь для всех трех рассматриваемых случаев нагрузки одинаковую номинальную частоту вращения, иначе невозможно сравнивать. Поэтому построенный в статье [1] график  $n(l)$  для нагрузки с постоянным моментом перестроен для  $n_n=2500$  об/мин, или, соответственно, для  $M_c=M_n=515,5$  Н·м (см. рис. 2, кривая 2). Из этого графика видно, что для кривой 2 рост частоты вращения ведомого вала муфты от нуля начинается при большей активной длине якоря по сравнению с другими видами нагрузки. Это объясняется тем, что механические характеристики муфты начинают пересекать механическую характеристику нагрузки при более высоком своем расположении (при больших моментах), которому и соответствует большая активная длина якоря (см. рис. 1).

**Зависимость момента муфты от активной длины якоря при различных видах нагрузки.** Чтобы получить зависимость  $M(l)$  момента муфты от активной длины якоря при различных видах нагрузки, нужно подставить найденные в [1] зависимости  $n(l)$  в уравнение нагрузки (2) при разных  $q$  (с учетом равенства моментов на муфте и нагрузке). Скольжение при этом будет изменяться (см. рис. 1).

1. Для нагрузки с линейно возрастающим моментом ( $q=1$ ) уравнение (2) запишется в виде

$$M = M_c + (M_i - M_c) \frac{n}{n_i}, \quad (3)$$

а зависимость  $n(l)$  имеет вид (см. [1])

$$n = \frac{k_2 + k_1 k_3 n_0 + k_1 k_4 - k_3 M_c - \sqrt{(k_2 + k_1 k_3 n_0 + k_1 k_4 - k_3 M_c)^2 - 4 k_1 k_3 (k_2 n_0 - k_3 M_c n_0 - k_4 M_c)}}{2 k_1 k_3}. \quad (4)$$

«Коэффициенты» в (4) находятся по формулам

$$k_1 = \frac{M_i - M_c}{n_i}; \quad k_2 = \frac{\pi^2}{680} B_{m0}^2 D^3 l; \quad k_3 = \frac{\pi D}{12000} \frac{z}{z-2} \mu_{av} \left( 1 + \frac{D}{zl} \right); \quad k_4 = 4 \rho \left( \frac{z}{D} + \frac{1}{l} \right). \quad (5)$$

На рис. 4 (кривая 1) приводится график зависимости  $M(l)$  момента на ведомом валу муфты от активной длины якоря для нагрузки с линейно возрастающим моментом, построенный по (3) и (4) с «коэффициентами» (5). Этот график можно также построить по точкам, получающимся при пересечении механических характеристик муфты и нагрузки (см. рис. 1, а): видно, что при увеличении активной длины (через 0,08 м) момент растет не прямо пропорционально, а медленнее.

От  $l=0$  до  $l=0,044$  м момент муфты меньше постоянной составляющей  $M_c$  момента нагрузки, поэтому скорость ведомого вала равна нулю (см. рис. 2, кривая 1). В этом интервале оба момента равны моменту на муфте, определяемому формулой (1\*) при  $n=0$  (этот график показан точками на рис. 4).

2. Для постоянной нагрузки ( $q=0$ ) уравнение (2) запишется в виде

$$M = M_i, \quad (6)$$

или

$$M = M_{\bar{n}}. \quad (7)$$

Тогда если  $n \neq 0$ , то при любой активной длине момент на муфте будет постоянным  $M(l) = M_i = M_{\bar{n}} = const$  (рис. 1, б; рис. 4, кривая 2), но частота вращения будет изменяться по формуле (см. [1])

$$n = \frac{M_i k_3 n_0 + M_i k_4 - k_2 n_0}{M_i k_3 - k_2} \quad (8)$$

с «коэффициентами» (5) (рис. 2, кривая 2). На рис. 4 точками (ромбиками) показана зависимость  $M(l)$  момента муфты по (1\*) при  $n=0$  (до начала вращения ведомого вала). Использование уравнения (2) не позволяет рассматривать переходные процессы при пуске привода с постоянной нагрузкой.

3. Для нагрузки, задаваемой квадратичной функцией ( $q=2$ ), уравнение (2) запишется в виде

$$M = M_c + (M_i - M_c) \left( \frac{n}{n_i} \right)^2. \quad (9)$$

При этом виде нагрузки формула для определения частоты вращения является решением кубического уравнения (см. [1])

$$an^3 + bn^2 + cn + d = 0, \quad (10)$$

где обозначено

$$a = \frac{k_1 k_3}{n_i}; \quad b = -(k_4 + k_3 n_0) \frac{k_1}{n_i}; \quad c = M_c k_3 - k_2; \quad d = k_2 n_0 - M_c k_3 n_0 - M_c k_4. \quad (11)$$

Два корня уравнения (10) являются посторонними. Третье решение (громоздкое выражение) при подстановке в (9) с учетом (11) и (5) дает график (рис. 4, кривая 3).

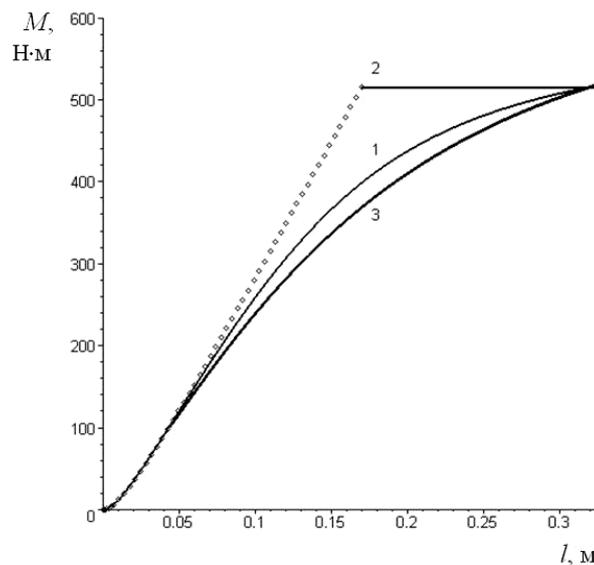


Рис. 4. Зависимость  $M(l)$  момента индукционной муфты с тремя степенями свободы от активной длины якоря:

1 — для нагрузки с линейно возрастающим моментом при  $M_c=100$  Н·м,  $M_n=515,5$  Н·м;

2 — для нагрузки с постоянным моментом при  $M_c=M_n=515,5$  Н·м; точками показана зависимость  $M(l)$  момента муфты по (1\*) при  $n=0$  (до начала вращения ведомого вала);

3 — для нагрузки, задаваемой квадратичной функцией при  $M_c=100$  Н·м,  $M_n=515,5$  Н·м.

Общие параметры:  $n_0=3000$  мин<sup>-1</sup>;  $n_n=2500$  мин<sup>-1</sup>;  $D=0,32$  м;  $\rho=0,16 \cdot 10^{-6}$  Ом·м;  $B_{m0}=0,623$  Тл;  $\mu_{ая}=0,458 \cdot 10^{-3}$  Гн/м;  $z=16$

В данном случае про интервал от  $l=0$  до  $l=0,044$  м можно сказать все то же, что и для нагрузки с линейно возрастающим моментом.

**Область применения.** Рациональной областью применения обычных индукционных муфт скольжения являются механизмы с моментом нагрузки, пропорциональным квадрату скорости вращения [4, с. 203]. При такой нагрузке приводы с муфтами скольжения часто оказываются более экономичными в сравнении с другими системами регулируемого привода [3, с. 7].

Из анализа рис. 2, 3, 4 можно сделать следующие выводы. Как вариатор частоты индукционная явнополюсная муфта скольжения с тремя степенями свободы лучше всего подходит для нагрузки с линейно возрастающим моментом и хуже всего – для нагрузки с постоянным моментом (см. рис. 2). Как вариатор момента такая муфта почти одинаково подходит как для нагрузки, задаваемой квадратичной функцией, так и для нагрузки с линейно возрастающим моментом, а для нагрузки с постоянным моментом регулирования момента не требуется (см. рис. 4). С точки зрения КПД такую муфту, так же как и обычную индукционную, наиболее рационально использовать для нагрузки, задаваемой квадратичной функцией, а наиболее неэкономично ее использование при нагрузке с постоянным моментом (см. рис. 3). Таким образом, область применения индукционной муфты с тремя степенями свободы – вариатор момента и частоты для нагрузки, задаваемой квадратичной функцией, и для нагрузки с линейно возрастающим моментом.

В заключение заметим, что требуется экспериментальная проверка полученных в работе результатов, а также исследование картины магнитного поля в индукционной муфте с тремя степенями свободы. Картина магнитного поля в обычной индукционной явнополюсной муфте хорошо известна (см. рисунки аналога и прототипа в [2]). Однако при выдвигании якоря из индуктора и, тем самым, уменьшении активной длины якоря от ее максимального (т. е. соответствующего обычной индукционной муфте) значения возможны искажения магнитного поля в плоскостях, проходящих через ось вращения. Эти искажения могут сказаться на исследованных в работе зависимостях. Кроме того, наличие на торце якоря кольца из немагнитного материала также может локально исказить картину магнитного поля. Поэтому не исключено, что конструкция муфты потребует доработки. Представляет интерес исследование распределения плотности тока в кольце из немагнитного материала и в якоре с таким кольцом с учетом поверхностного эффекта, а также вычисление тепловой мощности токов, текущих в немагнитном кольце.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харитонов Д.В. Анализ работы индукционной явнополюсной муфты скольжения с тремя степенями свободы // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2010. – № 2 (26). – С. 162-170.
2. Патент на ПМ № 94779, МПК H02K 49/00. Индукционная явнополюсная муфта скольжения с тремя степенями свободы (варианты) / Д.В. Харитонов (RU). – Заявка 2009132325/22, 26.08.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15.
3. Щетинин Т.А. Электромагнитные муфты скольжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
4. Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам / Под ред. В.С. Полякова. 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1979. – 344 с.

*Статья поступила в редакцию 7 сентября 2011 г.*

UDC 621.825 + 62-83

**DEPENDENCES OF THE TORQUE, FREQUENCY OF ROTATION  
AND EFFICIENCY OF INDUCTION CLUTCH WITH THREE DEGREES  
OF FREEDOM FROM ACTIVE LENGTH OF AN ARMATURE**

***D.V. Haritonov***

Samara State Technical University, branch to Syzran  
45, Soviet st., Syzran, 446001

*The paper refers to dependences of the torque on main shaft, and also frequencies of rotation and efficiency of induction clutch with three degrees of freedom from active length of an armature for loadings of various kinds are received at equal nominal frequency of rotation.*

***Keywords:*** *an induction clutch, degrees of freedom, regulation of clutch, active length of an armature, a variator of frequency, a variator of the torque, speed-torque characteristics, efficiency of clutch.*