

### Литература

1. Гаврилов Б.Г. Химизм предпламенных процессов в двигателях // – Ленинград: ЛГУ им. Жданова, 1970. – 183 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей // Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: 1985. – 375 с.
3. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей // - М.: “Высшая школа”. 1980 – 400с.
4. Кругов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания // – М.: 1998. – 415 с.
5. Назаров А.В. Устройство для управления воспламенением топливо-воздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания // - М.: 2002. – Деп. в ЦВНИ МО РФ 15.01.02, № В4881
6. Ямпольский Ю.П. Элементарные реакции и механизм пиролиза углеводородов // – М.: Химия, 1990. – 300 с.
7. С 1 2334883 RU F 02 В 55/16, F 02 М 27/04. Многотопливный роторный двигатель / Еремин Б.Г., Мартынов С.В., Назаров А.В., Ситников А.П., Царьков А.Н. (МОУ ИИФ РФ № 2007101474/06; Заявл. 17.01.2007 // Изобретения (Заявки и патенты). 2008. - № 27.
8. U1 87472 RU F 02 М 27/04. Устройство для обработки топлива двигателя внутреннего сгорания / Еремин Б.Г., Мартынов С.В., Назаров А.В., Потураев С.Е., Ситников А.П., Царьков А.Н. (МОУ ИИФ РФ № 2009121158/22; Заявл. 04.06.2009 // Изобретения (Заявки и патенты). 2009. - № 28.
9. U1 75432 RU F 02 М 27/00. Устройство для приготовления топливно-воздушной смеси для двигателя внутреннего сгорания / Литвинов Р.С., Потураев С.Е., (СВИ РВ РФ № 2007134677/22; Заявл. 17.09.2007 // Изобретения (Заявки и патенты). 2007.

### **Рациональные законы управления тяговым асинхронным электроприводом**

к.т.н. Нгуен Куанг Тхиеу, Марков В.В.

МГТУ «МАМИ»

(495) 223-05-23, доб. 1312, t3\_ru@yahoo.com

*Аннотация.* В статье рассмотрены оптимальные законы управления тяговыми асинхронными электроприводами (АЭП) по минимуму различных видов потерь, минимуму потребляемой активной и реактивной мощностей, максимуму перегрузочной способности. Установлено, что совместное управление по максимуму момента и минимуму суммарных потерь в двигателе является наиболее рациональным законом управления тяговыми АЭП.

*Ключевые слова:* асинхронный электропривод; оптимальные законы управления электроприводом; потери мощности

Современный уровень развития силовой электроники и микропроцессорных средств управления позволяет создавать на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД) высококачественные регулируемые тяговые АЭП, применяемые на различных образцах гибридных автомобилей и электромобилей. В простейшем случае система тягового АЭП представляет собой энергетический комплекс «тяговая аккумуляторная батарея – автономный инвертор напряжения (АИН) – АД». Одним из преимуществ внедрения АЭП в автомобильных транспортных средствах (АТС) является возможность оптимизации их рабочих режимов для получения высоких энергетических показателей, обеспечивающей требуемые тягово-динамические качества АТС. Управление АЭП по какому-либо критерию оптимизации всегда возможно благодаря присутствию свободной переменной состояния АД, не участвующей в формировании момента.

В связи с требованием регулирования скорости в широких пределах в АЭП обычно применяются системы подчиненного регулирования координат, где внешним контуром регулируется скорость, а внутренними контурами – момент (токи) и магнитные потоки. Такое

построение системы управления (СУ) обусловлено тем, что длительности переходных электромагнитных процессов в АД несоизмеримо малы по сравнению с длительностью переходных процессов изменения скорости АТС. Поэтому, независимо от вида движения АТС (разгона, движения с постоянной скоростью, замедления, торможения), можно считать, что АД в электромагнитном отношении находится в статическом (установившемся) режиме. Последнее обстоятельство позволяет формировать заданные значения потокосцеплений, токов для внутренних контуров исходя из статических зависимостей АЭП по желаемым критериям оптимальности.

В настоящее время в теории, а также на производственной практике выделены основные законы оптимального управления АЭП: по минимуму тока статора, минимуму потерь в меди, минимуму суммарных потерь, максимуму КПД, максимуму коэффициента мощности  $\cos\phi$  АД; по минимуму суммарных потерь, максимуму КПД, максимуму перегрузочной способности АЭП и, возможно, еще по другим законам.

Несмотря на широкий выбор вышеотмеченных критериев оптимизации, в теории тягового электропривода подтверждено положение о нерациональности использования какого-либо одного варианта оптимального управления. Обеспечение высоких энергетических и динамических показателей АЭП возможно только при рациональном сочетании законов оптимального управления ими, а выбор нужного сочетания необходимо уточнить в процессе проектирования тяговой системы АТС [1]. Возникает естественное желание более глубоко изучить эти сочетания в теоретическом плане и выработать более конкретные рекомендации применения оптимальных критериев для управления АЭП на практике.

Самым распространенным подходом к исследованию оптимальных режимов АЭП является применение математических моделей его основных силовых агрегатов (энергоустановки, АИН, АД) для определения экстремумов выбираемых функций качества. Полученные разными авторами аналитические условия оптимальных режимов АЭП иногда имеют сложный вид, что затрудняет их использование для оценки энергоэффективности различных законов управления в стадии проектирования систем управления АЭП и их реализацию на практике.

В статье путем модифицирования математической модели АД установлены аналитические условия оптимизации режимов АД, которые отличаются простотой для практических применений.

### Математическая модель АД с учетом потерь в стали

Процессы энергопреобразования в трехфазном АД при общепринятых допущениях можно описать системой уравнений [2]:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + p \mathbf{\Psi}_s + j\omega_k \mathbf{\Psi}_s; \\ \mathbf{0} = R_r \mathbf{i}_r + p \mathbf{\Psi}_r + j\omega_s \mathbf{\Psi}_r; \\ \mathbf{\Psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r; \mathbf{\Psi}_r = L_r \mathbf{i}_r + L_m \mathbf{i}_s; \mathbf{\Psi}_m = L_m \mathbf{i}_m; \mathbf{i}_m = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_r; \\ M = 1,5z_p (L_m / L_r) \text{Im}\{\mathbf{i}_s \mathbf{\Psi}_r^*\}, \end{cases} \quad (1)$$

где:  $\mathbf{u}, \mathbf{i}, \mathbf{\Psi}$  – результирующие векторы напряжения, тока, потокосцепления;  $R, L$  – активное сопротивление и индуктивность; индексы «s, r, m» соответствуют величинам статора, ротора и контура намагничивания;  $\omega_k$  – угловая частота вращения ортогональной системы координат;  $\omega, \omega_r = z_p \omega$  – механическая и электрическая угловые частоты вращения ротора;  $z_p$  – число пар полюсов;  $\omega_s = \omega_k - \omega_r$  – угловая частота скольжения;  $M$  – развиваемый АД электромагнитный момент;  $p$  – оператор дифференцирования. Здесь и далее переменные, отмеченные жирными шрифтами, обозначают векторные величины.

В системе уравнений (1) насыщение магнитопровода АД, как обычно, учитывается зависимостью индуктивности  $L_m$  от намагничивающего тока  $I_m$  или главного потокосцепления  $\Psi_m$ , т.е. нелинейной функцией  $L_m = f(I_m)$  или  $L_m = f(\Psi_m)$ . Однако использование (1)

для аналитического определения оптимальных режимов АД с учетом насыщения часто приводит к громоздким математическим формулам [3]. Ниже рассмотрим возможность упрощения (1) для лишения ее вышеотмеченного недостатка.

Введя модифицируемые векторы потокосцепления  $\mathbf{\Psi}_R$  и тока  $\mathbf{i}_R$  ротора [4]:

$$\mathbf{\Psi}_R = \mathbf{\Psi}_l L_m / L_r; \mathbf{i}_R = \mathbf{i}_r L_r / L_m,$$

при учете потерь в стали АД активным сопротивлением  $R_M$ , включенным последовательно с индуктивностью контура намагничивания  $L_M$ , можем преобразовать (1) к виду:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + p \mathbf{\Psi}_s + j \omega_k \mathbf{\Psi}_s + R_M \mathbf{i}_M; \\ 0 = R_R \mathbf{i}_R + p \mathbf{\Psi}_R + j \omega_s \mathbf{\Psi}_R; \\ \mathbf{\Psi}_s = L_\sigma \mathbf{i}_s + \mathbf{\Psi}_R; \mathbf{\Psi}_R = L_M \mathbf{i}_M; \mathbf{i}_M = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_R; \\ M = 1,5 z_p \operatorname{Im} \{ \mathbf{i}_s \mathbf{\Psi}_R^* \}, \end{cases} \quad (2)$$

где:  $R_R = R_r L_m^2 / L_r^2$ ;  $L_M = L_m^2 / L_r$ ;  $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ .

Схема замещения АД, соответствующая (2), представлена на рисунке 1. Для упрощения математической модели АД принято допущение о том, что в процессе работы двигателя потери в стали ротора малы по сравнению с потерями в стали статора. Поэтому активное сопротивление  $R_M$  присутствует только в уравнении равновесия напряжения обмоток статора, т.е. в первом уравнении системы (2).

Как известно, потери в стали АД  $\Delta P_{cm}$  можно определить формулой [2]:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cmном} (\Psi_m^2 / \Psi_{mном}^2) (\omega_1 / \omega_{1ном})^{1,3}, \quad (3)$$

где:  $\omega_1$  – угловая частота напряжения статорной обмотки; нижним индексом «ном» обозначены номинальные величины.

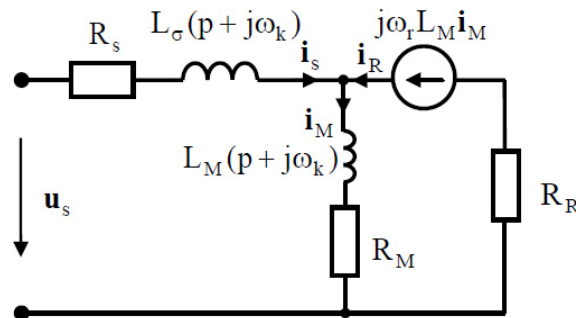


Рисунок 1 – Схема замещения АД

Из (3) можно вывести выражение, определяющее сопротивление  $R_M$ :

$$R_M = R_{Mном} (\omega_1 / \omega_{1ном})^{1,3}, \quad (4)$$

где:  $R_{Mном} = \Delta P_{cmном} / (1,5 I_{Mном}^2)$ ,  $I_{Mном}$  – модуль вектора  $\mathbf{i}_M$  в номинальном режиме.

В системе координат (d, q), ориентированной по вектору  $\mathbf{\Psi}_R$  ( $\Psi_{Rd} = \Psi_R, \Psi_{Rq} = 0$ ), из (2) имеем следующие соотношения в статических режимах:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{sd} = (R_s + R_M) \mathbf{i}_{sd} - \omega_1 \sigma L_s \mathbf{i}_{sq}; \mathbf{u}_{sq} = \omega_1 L_s \mathbf{i}_{sd} + R_s \mathbf{i}_{sq}; \\ \mathbf{i}_{sd} = \Psi_R / L_M; \mathbf{i}_{sq} = \omega_s \Psi_R / R_R; \mathbf{i}_{Rd} = 0; \mathbf{i}_{Rq} = -\mathbf{i}_{sq}; \mathbf{i}_{Md} = \mathbf{i}_{sd}; \mathbf{i}_{Mq} = 0; \\ \Psi_{sd} = \Psi_R L_s / L_M; \Psi_{sq} = L_\sigma \omega_s \Psi_R / R_R; \\ M = 1,5 z_p \Psi_R^2 \alpha / L_M, \end{cases} \quad (5)$$

здесь нижними индексами «d, q» обозначены проекции векторов переменных состояния АД (напряжения статора, токов, потокосцеплений) на соответствующие оси системы координат (d, q); параметр  $\alpha$  представляет собой отношение составляющей  $\mathbf{i}_{sq}$  к составляющей  $\mathbf{i}_{sd}$  век-

тора  $i_s$  в системе координат  $(d, q)$ :

$$\alpha = i_{sq} / i_{sd} = \omega_s T_R, \quad (6)$$

где:  $T_R = L_M / R_R$  – постоянная времени роторной цепи.

Из (5) и (6) можно вывести аналитические формулы, определяющие потребляемую АД активную мощность  $P_1$ , суммарные потери мощности  $\Delta P_\Sigma$  (в меди и стали), реактивную мощность  $Q$ , КПД  $\eta_{АД}$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 1,5(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) = \Delta P_\Sigma + P_2; \\ \Delta P_\Sigma = \frac{M}{z_p L_M} \left[ (R_s + R_R)\alpha + \frac{R_s + R_M}{\alpha} \right]; \\ Q = 1,5(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) = \frac{M}{z_p L_M} \left[ \omega_1 L_s \left( \frac{1}{\alpha} + \sigma\alpha \right) - R_M \right]; \\ \eta_{АД} = P_2 / P_1; \quad \cos \varphi = P / \sqrt{P^2 + Q^2}, \end{array} \right. \quad (7)$$

где:  $P_2 = M\omega$  – механическая мощность.

Потери мощности  $\Delta P_{И}$  в АИН зависят от параметров силовых ключей, частоты коммутации, напряжения, тока статора, потребляемой АД активной мощности, однако в первом приближении их можно аппроксимировать функцией от квадрата тока статора:

$$\Delta P_{И} = 1,5 R_{И} I_s^2, \quad (8)$$

где:  $R_{И}$  – коэффициент аппроксимации, корректируемый на каждом шаге расчета, эквивалентный активному сопротивлению, учитывающему потери в АИН.

Суммарные потери мощности  $\Delta P_{АЭП}$  в АИН и АД, определяемые из (8) и 2-ого уравнения системы (7):

$$\Delta P_{АЭП} = \Delta P_\Sigma + \Delta P_{И} = \frac{M}{z_p L_M} \left[ (R_s + R_R + R_{И})\alpha + \frac{R_s + R_M + R_{И}}{\alpha} \right]. \quad (9)$$

#### Аналитическое определение оптимальных режимов АЭП

При заданных значениях момента  $M$  и угловой скорости  $\omega$ , из (7) можно определить соответствующие значения параметра  $\alpha$ , обеспечивающие оптимальные режимы АД по минимуму суммарных потерь  $\Delta P_\Sigma$ , максимуму КПД  $\eta_{АД}$  или минимуму потребляемой активной мощности  $P_1$ :

$$\frac{dP_1}{d\alpha} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\Delta P_\Sigma}{d\alpha} = 0 \Leftrightarrow \frac{d\eta_{АД}}{d\alpha} = 0 \Leftrightarrow \alpha = \pm \sqrt{\frac{R_s + R_M}{R_s + R_R}}. \quad (10)$$

Приближенно можно определить условие минимума потребляемой реактивной мощности:

$$dQ/d\alpha = 0 \Leftrightarrow \alpha = \pm \sqrt{\sigma}. \quad (11)$$

Из (10) следует условие минимума потерь в меди ( $R_M = 0$ ):

$$\alpha = \pm \sqrt{R_s / (R_s + R_R)}. \quad (12)$$

При минимуме тока статора (минимуме электрических потерь в обмотках статора):

$$I_s = I_{s\min} \Leftrightarrow \alpha = \pm 1. \quad (13)$$

Условие минимума суммарных потерь в АЭП можно определить из (9):

$$\frac{d\Delta P_{АЭП}}{d\alpha} = 0 \Leftrightarrow \alpha = \pm \sqrt{\frac{R_s + R_M + R_{И}}{R_s + R_R + R_{И}}}. \quad (14)$$

В (10)-(14) знак «+» соответствует двигательному режиму, а «-» – генераторному.

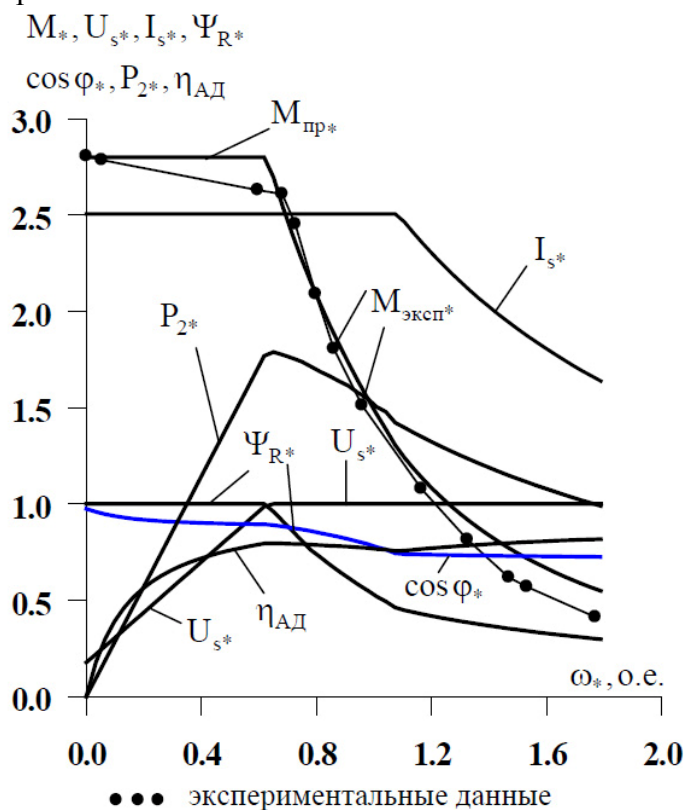
Анализируя полученные выражения (10) и (14), можно отметить, что глобальные усло-

вия минимума суммарных потерь в АД и АЭП зависят от скорости движения привода в силу зависимости потерь в стали от частоты напряжения питания согласно (4).

Для тяговых АЭП важно во время разгона или экстренного торможения развивать максимально возможные значения момента и мощности на валу АД. Естественно, что эти режимы достигаются только при максимальных значениях тока и напряжения статора АД, поэтому критериями оптимальности для АЭП в этих случаях должны служить максимизация момента при максимальном токе ( $I_s = I_{s\max}, U_s < U_{s\max}$ ) в области низких скоростей движения электропривода; максимизация мощности при максимальных значениях тока и напряжения статора ( $I_s = I_{s\max}, U_s = U_{s\max}$ ); максимизация момента в области высоких скоростей при максимальном напряжении ( $I_s < I_{s\max}, U_s = U_{s\max}$ ).

В тяговых АЭП значения  $U_{s\max}, I_{s\max}$  определяются ресурсами тяговой аккумуляторной батареи по току и напряжению, допустимыми условиями по перегреву АД, по безопасной работе полупроводниковых ключей АИН. Кроме того, при разгоне АТС требуемый ток статора, соответствующий требуемому моменту, может привести магнитную цепь АД к насыщенному состоянию. Для эффективного использования ресурсов силовых агрегатов АЭП по току следует ограничивать потокосцепление ротора на максимальном (насыщенном) уровне, равном  $\Psi_{R\max}$ . Методика аналитического определения предельной перегрузочной способности АЭП при вышеотмеченных ограничениях приведена в [5].

На рисунке 2 представлены предельные по перегрузочной способности характеристики АД с параметрами:  $z_p = 2$ ;  $R_s = 0,0163 \text{ Ом}$ ;  $R_R = 0,01 \text{ Ом}$ ;  $R_{\text{МНОМ}} = 0,085 \text{ Ом}$ ;  $L_M = 4,1 \text{ мГн}$ ;  $L_\sigma = 0,3 \text{ мГн}$ ;  $\Psi_{\text{РНОМ}} = 0,23 \text{ Вб}$ ;  $U_{\text{ШНОМ}} = 60 \text{ В}$ ;  $I_{\text{ШНОМ}} = 160 \text{ А}$ ;  $M_{\text{НОМ}} = 100 \text{ Нм}$ ;  $\omega_{\text{НОМ}} = 50 \text{ Гц}$ ;  $P_{2\text{НОМ}} = 15 \text{ кВт}$ . Нижними индексами «звездочка» обозначают величины в относительных единицах, за базовые принимаются их номинальные значения.

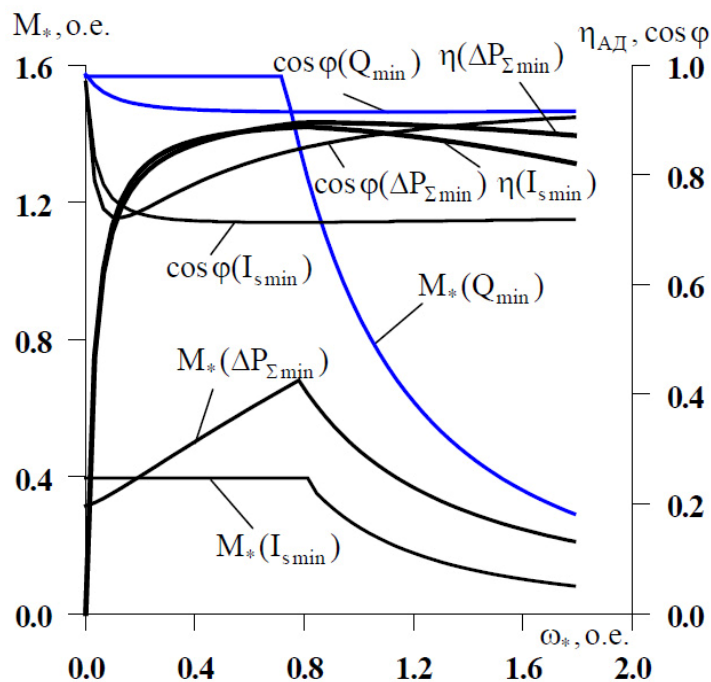


**Рисунок 2 – Предельные характеристики АД по перегрузочной способности**

На основании полученных оптимальных условий работы АД (10) – (14) проведено исследование его основных энергетических показателей (КПД,  $\cos \varphi$ ) в отмеченных рабочих режимах. Режим минимума потерь в АЭП (14) близок к режиму минимума суммарных по-

терь в двигателе (10). С точки зрения энергоэффективности режим минимума потерь в меди (12) не имеет никакого преимущества перед режимами (10), (13), (14).

На рисунке 3 представлены результаты расчетов механических и энергетических характеристик при минимуме тока статора ( $I_{s\min}$ ), минимуме суммарных потерь в АД ( $\Delta P_{\Sigma\min}$ ), минимуме потребляемой реактивной мощности ( $Q_{\min}$ ). Данные характеристики построены при постоянстве потокосцепления  $\Psi_R = \Psi_{R\max}$  в области скорости, где  $U_s \leq U_{\text{шом}}$ , а дальнейшее увеличение скорости АЭП происходит за счет ослабления магнитного поля при постоянном напряжении статора.



**Рисунок 3 – Механические и энергетические характеристики АД при минимуме тока статора, минимуме суммарных потерь и минимуме потребляемой реактивной мощности**

Из рисунка 3 можно заметить, что:

- закон минимума тока (13) имеет самое низкое значение  $\cos \varphi$  во всем диапазоне изменения скорости АД. При управлении АЭП по данному закону двигатель не может развивать момент, превышающий 40% номинального момента.
- закон минимальных потерь (10) обеспечивает лучшие показатели КПД и  $\cos \varphi$  во всем диапазоне изменения скорости АД. Область механической характеристики, в которой возможно регулирование АД по критерию минимума суммарных потерь, шире, чем та область при минимуме тока статора. Для рассматриваемого АД видно преимущество закона минимальных потерь перед законом минимума тока;
- в области скоростей меньше номинальной КПД АД при управлении по минимуму потребляемой реактивной мощности имеет низкое значение по сравнению с законами минимума потерь и минимума тока.

### Выводы

Полученные результаты теоретического и численного исследований оптимальных режимов АД позволяют сделать следующие выводы:

- установленная совокупность аналитических соотношений (7), (10)-(14) позволяет эффективно решить задачу оптимизации режимов АД по критериям минимизации различных видов потерь;
- совместное управление по максимуму момента и минимуму суммарных потерь в двигателе является наиболее рациональным законом управления тяговыми АЭП.

### Литература

1. Теория и расчет тягового привода электромобилей / Под ред. Ефремова И.С. –М.: Высшая школа, 1984. –383с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов.- 2-е изл.перераб. и доп. –М: Энергоатомиздат, 2001. -704с.
3. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков. Под ред. И.Я. Блаславского. –М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256с.
4. De Doncker R.W., Novotny D.W. The universal field oriented controller // IEEE Trans. on Ind. Applications, vol. 30, Jan./Feb., 1994, pp. 92-100.
5. Тяговые электроприводы и устройства энергообеспечения автотранспортных средств / Е.М. Овсянников, Нгуен Куанг Тхиеу. –М.: Изд. «Палеотип», 2009. -244с.

### Результаты испытаний отечественной и зарубежных шин для малогабаритной техники

к.т.н. доц. Подрубалов В.К., Дмитриева Л.А., Подрубалов М.В.  
МГТУ «МАМИ», МГУ Л

*Аннотация.* Рассматриваются результаты экспериментальных исследований на многофункциональном стенде характеристик трех моделей шин, используемых при комплектации квадроциклов. Дана оценка жесткостных параметров шин при различных внутренних давлениях. Подробно исследованы их тягово-сцепные свойства на жестком и деформируемом основаниях. Даны рекомендации по их применению.

*Ключевые слова:* шины для квадрациклов, технические характеристики, результаты испытаний

Создание мобильной малогабаритной техники (МГТ), удовлетворяющей потребителя по таким важным эксплуатационным показателям, как вибронегруженность, тягово-сцепные свойства и проходимость, невозможно без знания характеристик применяемых шин. Поэтому проведение экспериментальных работ в этом направлении является весьма актуальным.

В данном исследовании изучались выходные параметры отечественной (с размерами 25x11-12) и двух иностранных (25x12-10 и 22x8-10 фирмы Данлоп) шин. Параметры общего значения определялись при нагрузках и соответствующих им давлениях воздуха в соответствии с ТУ и проспектов фирмы Данлоп.

Технические показатели и параметры общего значения представлены в таблице 1 и графиками на рисунках 1 и 2.

Таблица 1

Технические показатели шин

№№ п/п	Показатели	Размеры и модель шин		
		25x11-12	25x12-10 Данлоп	22x8-10 Данлоп
1	Наружный диаметр D, мм	573	648	570
2	Ширина профиля В, мм	270	272	185
3	Ширина беговой дорожки в, мм	220	237	168
4	Число пар грунтозацепов, шт.	-	-	-
5	Высота грунтозацепов по ц.б.д., мм	16	9	7
6	Высота профиля шины Н, мм	132,4	197	158
7	Средняя расчетная радиальная деформация, мм	15	39,4	30,3
8	Относительная деформация, .	0,11	0,20	0,19