

## **Исследование опорной проходимости автомобилей с учетом несовпадения колеи передних и задних колёс**

к.т.н. доц. Острецов А.В.<sup>1</sup>, д.т.н. проф. Шарипов В.М.<sup>1, 2</sup>,  
к.т.н. доц. Бернацкий В.В.<sup>1</sup>, к.т.н. Есаков А.Е.<sup>1</sup>, Мордасов А.С.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Университет машиностроения, <sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана  
(495) 223-05-23, доб. 1111, trak@mami.ru

*Аннотация.* Приведены результаты исследований влияния несовпадения колеи передних и задних колёс автомобилей с колёсной формулой 4x2 и 4x4 на их опорную проходимость. Оценка опорной проходимости проводилась с использованием результатов экспериментальных исследований автомобилей, а также расчетным методом с помощью математической модели движения автомобиля по деформируемой опорной поверхности. Величина несовпадения колеи, прокладываемой передними и задними колесами, характеризовалась коэффициентом несовпадения колеи.

*Ключевые слова:* колея колёсной машины, полноприводный автомобиль, неполноприводный автомобиль, опорная проходимость, нагрузка на ось, давление воздуха в шинах, удельная сила тяги на крюке автомобиля, коэффициент сопротивления качению, глубина колеи, скорость движения, деформируемая опорная поверхность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках договора №9905/17/07-к-12 между ОАО «КАМАЗ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана

Опорная проходимость автомобиля зависит от ряда факторов таких, как распределение нагрузки и крутящих моментов по осям, величина давления воздуха в шинах, несовпадение колеи передних и задних колёс и др. При этом существенное влияние на опорную проходимость автомобиля оказывает несовпадение колеи передних и задних колёс. Это связано с тем, что при полном несовпадении колеи передние и задние колёса машины даже при прямолинейном движении прокладывают новую колею, на что затрачивается дополнительная мощность.

В настоящее время большинство армейских автомобилей многоцелевого назначения имеют одинаковую ширину колеи колёс всех мостов. Из них лишь ГАЗ-3308 («Садко») имеет колею колёс переднего моста на 3% большую, чем заднего (1820/1770 мм). Вместе с тем при криволинейном движении, при буксировании прицепов, а также и при прямолинейном движении грузовых автомобилей с колёсной формулой 4x2 и 6x4 с двускатной ошиновкой колёс задних мостов эти колёса частично или полностью двигаются по недеформированному передними колёсами грунту. При движении большинства автомобилей по криволинейной траектории кинематика рулевого привода управления поворотом передних управляемых колёс обеспечивает движение передних и задних колёс по разным траекториям (задние колеса создают свою колею или перемещаются по траектории с частичным перекрытием колеи передних колёс) [1, 2]. Поэтому определение влияния ширины колеи, прокладываемой колёсами разных осей, на показатели опорной проходимости автомобилей является весьма актуальным. Особый интерес это представляет для автомобилей многоцелевого назначения.

Уровень опорной проходимости колёсных машин определяется и оценивается двумя методами [3 – 12]:

- экспериментальными исследованиями [3 – 6], проводимыми, как правило, на стадии разработки опытных образцов колёсных машин;
- расчётными методами [7 – 12], позволяющими оценивать эффективность решений по повышению опорной проходимости, принимаемых в процессе проектирования колёсной машины.

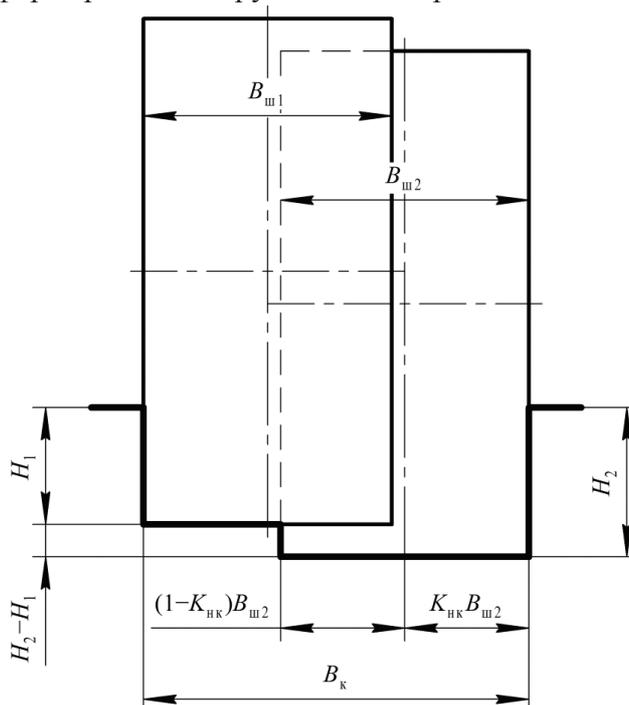
Учитывая сказанное, оценка влияния несовпадения колеи колёс передней и задней осей автомобилей с колёсной формулой 4x2 и 4x4 на их опорную проходимость проводилась как с использованием результатов экспериментальных исследований автомобилей, у которых из-

менялась ширина колеи задних колёс, так и с помощью разработанной в НИИИ АТ ЗЦНИИ МО РФ математической модели прямолинейного движения автомобиля по деформируемой грунтовой поверхности [7].

Величина несовпадения колеи, прокладываемой передними и задними колёсами, характеризуется коэффициентом несовпадения колеи  $K_{НК}$  и представляет собой отношение ширины части заднего колеса, движущегося по недеформированному грунту, к общей его ширине  $B_{ш2}$  (рисунок 1):

$$K_{НК} = (B_k - B_{ш1}) / B_{ш2}.$$

Таким образом, при  $K_{НК} = 0$  задние колёса двухосного и трёхосного автомобилей с однокатной ошиновкой полностью движутся по следам передних, а при  $K_{НК} = 1$  – они полностью движутся по недеформированной грунтовой поверхности.



**Рисунок 1. Схема прокладывания колеи колёсной машиной:  $B_k$  – ширина колеи, прокладываемой колёсной машиной;  $B_{ш1}$  и  $B_{ш2}$  – ширина переднего и заднего колёс, соответственно;  $H_1$  и  $H_2$  – глубина колеи, прокладываемой передним колесом и колёсной машиной, соответственно**

Математическая модель [7] позволяет рассчитывать основные параметры опорной проходимости автомобиля, определяемые ГОСТ Р В 52048-2003 [13]:

- наибольшую удельную силу тяги на крюке  $K_T max$ ;
- коэффициенты сопротивления качению  $f_a$ ;
- глубину образуемой колеи  $h_a$ ;
- максимальную скорость прямолинейного равномерного движения одиночного автомобиля  $V_{max}$ .

В результате выполненных исследований установлено, что расхождение значений показателей, полученных в результате расчетов с использованием математической модели [7], с экспериментальными данными, не превышает по  $K_T max$  – 11 %,  $f_a$  – 9 %,  $h_a$  – 8 % и  $V_{max}$  – 15...18 %. Следовательно, данная математическая модель может быть использована для оценки опорной проходимости колёсных машин.

Расчеты проводились для движения по трём наиболее представительным грунтовым поверхностям:

- сухому сыпучему песку влажностью около 4 % (грунт 1);
- свежевспаханному проборонованному суглинку влажностью около 25 % в осенний пери-

од (грунт 2);

- слежавшейся суглинистой пахоте влажностью около 30 % (грунт 3).

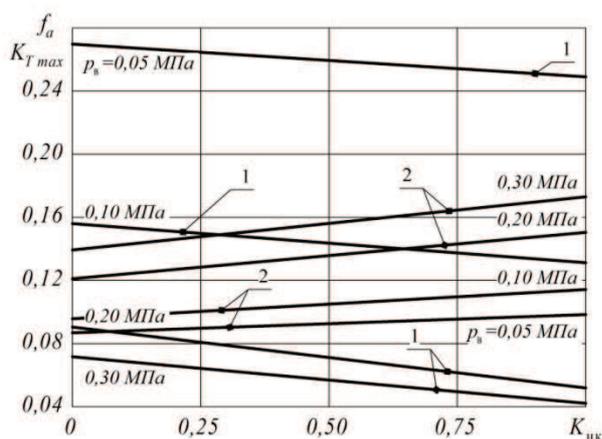
Основные исходные данные для расчетов представлены в таблицах 1 и 2.

Влияние степени несовпадения колеи колес на показатели опорной проходимости автомобиля с колёсной формулой 4x2 определялось экспериментально с использованием автомобиля-лаборатории, оборудованного системой регулирования давления воздуха в шинах, полной массой 7300 кг, и её распределением  $G_1/G_a = 0,4$  с отключенным приводом колёс переднего моста, а также расчетным путем по методике [7].

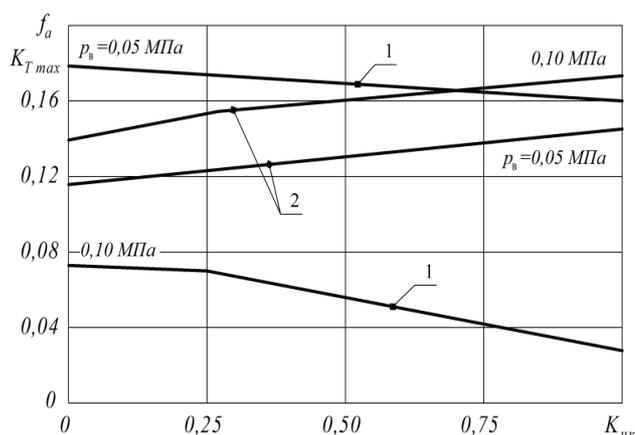
Результаты этих исследований при изменении коэффициента несовпадения колеи колёс  $K_{НК}$  от 0 до 1,0 представлены на рисунке 2 и рисунке 3.

С ростом  $K_{НК}$ , что очевидно, растет сопротивление качению автомобиля  $f_a$  и тем интенсивнее, чем выше давление воздуха в шинах. Так, при движении по слежавшейся суглинистой пахоте с изменением  $K_{НК}$  от 0 до 1,0 коэффициент сопротивления качению  $f_a$  при давлении воздуха в шинах 0,05 МПа увеличивается от 0,087 до 0,100 (в 1,15 раза), а при давлении 0,3 МПа – от 0,14 до 0,172 (в 1,23 раза).

На менее прочных (более деформируемых) грунтовых поверхностях влияние увеличения  $K_{НК}$  на показатели опорной проходимости сказывается более существенно. Так, например, на свежевспаханном проборонованном суглинке (рисунок 3) коэффициент сопротивления качению  $f_a$  при изменении  $K_{НК}$  от 0 до 1,0 и давлении воздуха в шинах 0,05...0,10 МПа увеличивается в 1,20...1,23 раза.



**Рисунок 2. Показатели опорной проходимости автомобиля по слежавшейся пахоте (грунт 3) при различных величинах давления  $p_B$  воздуха в шинах: 1 –  $K_{T\ max}$ ; 2 –  $f_a$**



**Рисунок 3. Показатели опорной проходимости автомобиля по свежевспаханному суглинку (грунт 2) при различных величинах давления  $p_B$  воздуха в шинах: 1 –  $K_{T\ max}$ ; 2 –  $f_a$**

Вместе с повышением сопротивления качению при увеличении  $K_{НК}$  ухудшаются и тягово-скоростные показатели автомобиля. Их изменение зависит также от давления воздуха в шинах. Так, при движении по вспаханному проборонованному суглинку с изменением  $K_{НК}$  от 0 до 1,0 максимальная удельная сила тяги на крюке автомобиля  $K_{T\ max}$  при давлении воздуха в шинах 0,05 МПа снижается от 0,18 до 0,16 (на 12 %), а при давлении воздуха 0,2 МПа – от 0,005, когда автомобиль движется на грани потери проходимости, до минус 0,03 (на рисунке 3 не показано). В этом случае, недостаточная для обеспечения движения автомобиля сила тяги составляет 2,2 кН.

При движении по слежавшейся суглинистой пахоте (рисунок 2) максимальная удельная сила тяги  $K_{T\ max}$  при давлении воздуха в шинах 0,05 МПа снижается от 0,27 до 0,25 (на 8 %), а при давлении 0,3 МПа – от 0,07 до 0,04 (в 1,7 раза).

Снижается также и максимальная скорость движения автомобиля. На слежавшейся суглинистой пахоте, например, при давлении воздуха в шинах 0,3 МПа скорость автомобиля снижается на 17 %, а на вспаханном проборонованном суглинке при давлении воздуха в шинах 0,1 МПа – на 12 %.

Таким образом, при увеличении коэффициента несовпадения колеи  $K_{НК}$  передних и задних колёс даже при прямолинейном движении автомобиля происходит ухудшение практически всех показателей его опорной проходимости.

У неполноприводных автомобилей со стандартными шинами и двускатными колесами на ведущих осях (ЗИЛ-431410, ГАЗ-3307, КамАЗ-53205) коэффициент несовпадения колеи  $K_{НК}$  (при одинаковых шинах) не может быть менее 0,5, а из-за наличия зазора между шинами задних двускатных колёс он на автомобилях с колесной формулой 4x2 и 6x4 составляет 0,54...0,55.

Влияние степени несовпадения колеи колёс на показатели опорной проходимости автомобиля с колесной формулой 4x4 определялось расчетным путем по методике [6]. Полная масса и размерные параметры образца были приняты применительно к автомобилю ГАЗ-39371 с шинами модели КИ-113 (таблицу 1).

Таблица 1

## Исходные данные для расчетов

Параметры	Автомобиль-лаборатория	ГАЗ-39371
Число осей	2	2
Колесная формула	4x2	4x4
Ошиновка колес	односкатная	односкатная
$G_a$ , кг	7300	7500
$G_1/G_a$	2920/7300 = 0,4	3600/7500 = 0,48
Колея, мм	1820	2230
$K_{НК}$	0...1,0	0...1,0
$N_{e \max}$ , кВт/ $n_{дН}$ , мин <sup>-1</sup> / $n_{дМ}$ , мин <sup>-1</sup>	110/3200/1800...2000	130/2400/1650
$u_o / u_{рк}$	7,34/2,08	7,99/1,0
$u_{кп}$	7,44; 4,10; 2,29; 1,47; 1,0	6,286; 3,391; 2,133; 1,351; 1,0
Шины: модель рисунок протектора $B_{ш}$ , мм $D$ , мм $r_{ст}$ , мм	регулируемого давления, 12.00R20 КИ-113 повышенной проходимости 340 1142 530	
Принятые обозначения: $G_a$ и $G_1$ – масса автомобиля полная и приходящаяся на переднюю ось, соответственно; $N_{e \max}$ – максимальная мощность двигателя; $n_{дН}$ и $n_{дМ}$ – частота вращения вала двигателя при максимальной мощности и максимальном крутящем моменте, соответственно; $u_o$ , $u_{рк}$ , $u_{кп}$ – передаточное число главной передачи, раздаточной коробки и коробки передач, соответственно; $B_{ш}$ , $D$ , $r_{ст}$ – ширина, наружный диаметр и статический радиус шины, соответственно.		

Расчеты проводились для движения по грунтам 1 и 2 (таблицу 2) с минимально допустимым давлением воздуха в указанных шинах (0,08 МПа) с изменением  $K_{НК}$  в пределах от 0 до 1,0 с шагом 0,1. Результаты расчетов представлены графически на рисунке 4. Экспериментально параметры опорной проходимости определялись при  $K_{НК} = 0$ .

Таким образом, установлено, что наименьшее удельное сопротивление качению  $f_a$  при движении автомобиля ГАЗ-39371 (колесная формула 4x2) без тяги на крюке по песчаным и свежевспаханым суглинистым грунтовыми поверхностям соответствует полному совпадению колеи передних и задних колёс. При росте же несовпадения колеи удельное сопротивление качению  $f_a$  возрастает пропорционально величине коэффициента несовпадения колеи  $K_{НК}$  на 9,6% (от 0,125 до 0,137) на сухом сыпучем песке и на 18,6% (от 0,177 до 0,21) на свежевспаханном суглинке.

Удельная сила тяги на крюке  $K_T \max$  при росте несовпадения колеи колёс у автомобилей с колесной формулой 4x4 при минимально допустимом давлении воздуха в шинах снижается значительно в меньшей степени, чем у автомобилей с колесной формулой 4x2 при их

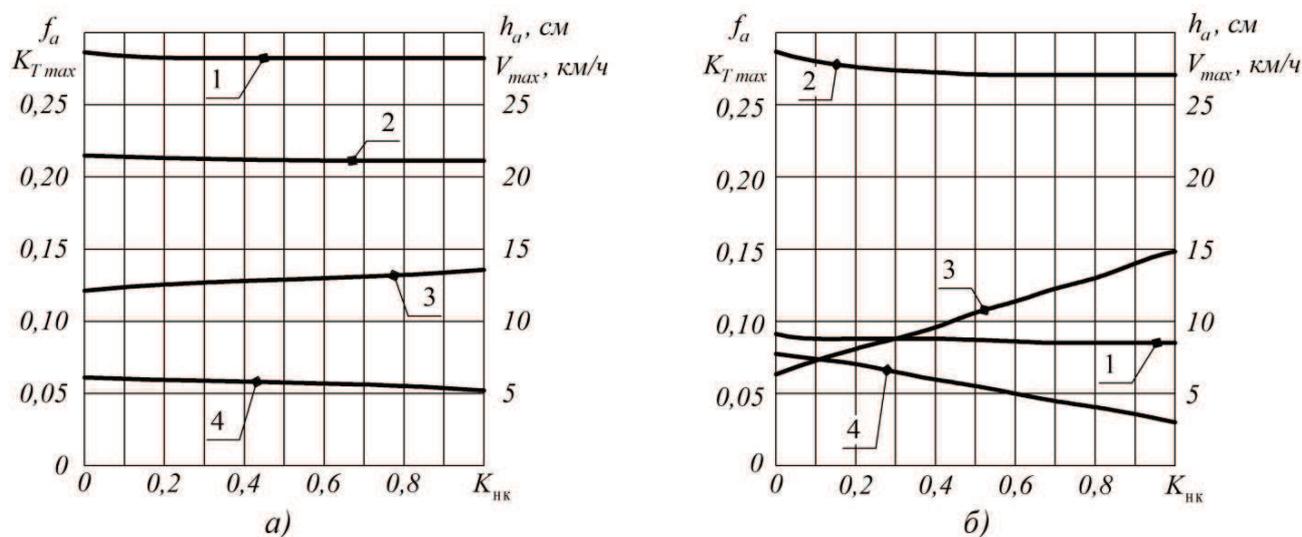
движении по деформируемым грунтовым поверхностям. При этом, на свежеспаханном проборонованном суглинке  $K_{T\ max}$  у автомобиля ГАЗ-39371 снизилась всего на 2 % (от 0,266 до 0,26), а у автомобиля с колёсной формулой 4x2 примерно той же массы – на 12 % (от 0,18 до 0,16). Максимальная глубина колеи  $h_a$  при этом уменьшается, но следует иметь в виду, что на опорной поверхности остаются колеи и от передних и от задних колёс.

Таблица 2

**Характеристика грунтов**

Тип грунта	$W, \%$	$\rho_{\Gamma}, \text{МПа}$	$\mu$	$k_{\text{ш}}$	$S_{\text{бм}}$	$\gamma_{\Gamma}, \text{кН/м}^3$
Грунт 1 (песок)	не более 4	0,882	0,25	0,4	0,4	14,2
Грунт 2 (свежеспаханный суглинок)	25	0,245	0,50	0,2	0,35	14,0...16,0
Грунт 3 (слежавшаяся пахота)	30	–	0,50	0,3	0,35	17,0...18,0

*Принятые обозначения:*  $W$  – влажность;  $\rho_{\Gamma}$  – удельное сопротивление грунта при вертикальной деформации его штампом на глубине 0,01 м;  $\mu$  – степенной коэффициент, учитывающий изменение сопротивления грунта по глубине вдавливания штампа;  $k_{\text{ш}}$  – коэффициент трения материала шины о грунт;  $S_{\text{бм}}$  – коэффициент буксования колёс машины;  $S_{\text{бм}} = (r_{k0} - r_k)/r_k$ , где  $r_{k0}$  и  $r_k$  – радиус колеса соответственно свободный и кинематический;  $\gamma_{\Gamma}$  – удельный вес грунта.



**Рисунок 4. Показатели опорной проходимости автомобиля ГАЗ-39371 в зависимости от коэффициента несовпадения колеи колёс при движении на шинах модели КИ-113 ( $p_{\text{в}} = 0,08 \text{ МПа}$ ) по сухому сыпучему песку (а) и свежеспаханному суглинку (б): 1 –  $V_{\text{max}}$ ; 2 –  $K_{T\ max}$ ; 3 –  $f_a$ ; 4 –  $h_a$**

Опорная проходимость автомобилей, особенно с колёсной формулой 4x2, существенно ухудшается при увеличении коэффициента несовпадения колеи  $K_{\text{нк}}$  передних и задних колес от 0 до 1,0.

**Литература**

1. Лукин П.П., Гаспарянц Г.А., Родионов В.Ф. Конструирование и расчёт автомобиля. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
2. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 2009. – 752 с.
3. Комаров В.А., Острецов А.В., Кондрашов В.Н. Влияние распределения крутящих моментов по осям автомобилей КамАЗ-4350, 5350 и 6350 на их опорную проходимость // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 1. – № 2 (20). – С. 48-51.

4. Острецов А.В., Шарипов В.М., Климова Е.В., Тарасова Л.И. Опорная проходимость полноприводных автомобилей по снежной целине // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №6. – С. 27-29.
5. Острецов А.В., Есаков А.Е., Шарипов В.М. Сравнительная оценка опорной проходимости автомобилей КамАЗ-4350, КамАЗ-43114 и Урал-4320-31 на сыпучем песке// Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – Т. 1. – № 1(19). – С. 50-55.
6. Котляренко В.И., Гончаренко С.В., Годжаев З.А., Шапиро В.Я. Шина сверхнизкого давления – оптимальный движитель для транспортных средств на слабонесущих грунтах // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 2. – С. 17-21.
7. Наумов А.Н., Чистов М.П. Математическая модель прямолинейного движения автомобиля по деформируемому грунту // Журнал ААИ. – 2007. – № 6 (47). – С. 14-18.
8. Вольская Н.С., Агейкин Я.С., Чичекин И.В., Ширяев К.Н. Методика определения глубины колеи под колёсами многоосной машины с учётом физико-механического состояния грунта // Журнал автомобильных инженеров. – 2013. – № 2 (79). – С. 22-25.
9. Курдюк В.А., Вольская Н.С., Русанов О.А. Расчетный метод моделирования деформационных свойств грунтов в задачах прогнозирования взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 2. – С. 12-16.
10. Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Прядкин В.И. Выбор параметров шин сверхнизкого давления для мобильных средств химизации // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – №4. – С. 14-17.
11. Прядкин В.И. Оценка опорно-сцепной проходимости средств химизации по почвам с низкой несущей способностью // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 5. – С. 15-18.
12. Трояновская И.П. Взаимодействие колесного движителя с грунтом на повороте с точки зрения механики // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 3. – С. 29-35.
13. ГОСТ Р В 52048-2003. Автомобили многоцелевого назначения. Параметры проходимости и методы их определения. – М.: Госстандарт России, 2003. – 11 с.

### **Формирование логики управления транзисторным инвертором привода электромобиля**

к.т.н. доц. Прохоров В.А.

Университет машиностроения

(495) 223-05-23, доб. 1312, [vitya.push@yandex.ru](mailto:vitya.push@yandex.ru)

*Аннотация.* Рассматриваются вопросы создания оптимальной логики управления полупроводниковыми ключами транзисторного инвертора для частотного управления асинхронным двигателем с целью исключения сквозных токов в стойках инвертора. Приводится конкретный схемный вариант решения поставленной задачи.

*Ключевые слова:* частотное управление асинхронным двигателем, трёхфазный транзисторный инвертор, распределитель импульсов, опасные сквозные токи в стойках инвертора, методы борьбы с ними, принципиальная электрическая схема распределителя импульсов.

В современной технике, например в станкостроении, на автомобилях и электромобилях, используется большое количество электроприводов. Наиболее перспективными из них являются электроприводы, реализованные на базе самых простых по конструкции, самых надёжных в работе и самых дешёвых асинхронных электродвигателей. Регулирование по частоте и величине трёхфазного напряжения на них формируется полупроводниковыми (чаще всего транзисторными) преобразователями напряжения и частоты. Конечным звеном таких преобразователей является мощный транзисторный преобразователь, называемый инвертором. Логика работы (переключения) транзисторных ключей инвертора формируется мало-мощным устройством, называемым распределителем импульсов. На рисунке 1 представлена