

УДК 621.311.212

О.А. Тищенко, С.Е. Шевченко

*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков*

## **ОЦЕНКА ПЕРЕВОДА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА АСИНХРОННУЮ ТЯГУ**

*На основании анализа конструктивных решений и характеристик тяговых двигателей железнодорожных составов наземного и подземного электротранспорта, способов их регулирования рассмотрены вопросы замены двигателей постоянного тока на асинхронные двигатели с частотным управлением. Рассмотрены особенности их управления, работы, недостатки и преимущества перед двигателями постоянного тока.*

***преобразователи частоты, регулируемые электроприводы, тяговый электродвигатель***

### **Введение**

**Постановка проблемы.** Развитие программы энергосбережения для всей страны предполагает поиск новых решений во всех направлениях, в том числе при решении вопроса совершенствования и

расширения машинного парка электроподвижных составов электротранспорта, замены дорогих двигателей постоянного тока (ДПТ) на надежные и дешевые АД. Выбор систем управления асинхронными тяговыми двигателями (АТД), помимо проблем

составления схем частотного управления, должен вестись с учетом особенностей самих двигателей и области эксплуатации.

**Анализ литературы.** Перспективы использования АД неоднократно рассматривались различными авторами [1 – 4], но эти работы были посвящены отдельно схемам частотного управления, отдельно – АД с частотным управлением. Материалы, представленные в статье, базируются на данных классических трудов по преобразовательной технике, на данных исследований, представленных в материалах конференций и в научных журналах.

**Цель статьи.** Оценить современное состояние и перспективы внедрения АД в качестве частотно управляемого асинхронного привода для электро-транспорта, проанализировать существующие схемы управления с учетом особенности эксплуатации железнодорожных составов. Т.е. выбирать системы частотного управления АД с учетом регулирования тяговых характеристик подвижных составов.

### Основной материал

Автоматизированный электропривод (АЭП) – структурная единица технологических производственных систем, который относится к группе основных потребителей электроэнергии (в той части, которая касается преобразования последней в механическую энергию), и направление своего развития формирует с учетом требований электроэнергетики и с учетом уровня развития смежных областей: электромашиностроения, силовой электроники и средств обработки информации.

Достигнутые в последние годы успехи в совершенствовании тиристорных и транзисторных преобразователей, особенно преобразователей частоты, дают основание предполагать, что в ближайшей перспективе развитие регулируемых электроприводов (ЭП) переменного тока, использующих двигателя более простой конструкции и с меньшей металлоемкостью, приведет к интенсивному вытеснению регулируемых ЭП постоянного тока, которые преобладают на сегодняшний день.

По нашему мнению, это особенно перспективно и требует немедленного внедрения при выборе тягового ЭП для электровозов городского наземного и подземного электротранспорта, пассажирских составов железных дорог. Известно, что выбор ДПП для электротяги определялся двумя их преимуществами:

- 1) высокая перегрузочная способность.
- 2) возможность легко, плавно, в широких пределах, с простым и дешевым оборудованием регулировать частоту вращения. Основными способами регулирования частоты вращения является изменение величины магнитного потока главных полюсов и напряжения, подводимого к якорной цепи.

Необходимость в частом изменении скорости движения электроподвижного состава требует использования тягового ЭП с высокой перегрузочной способностью по моменту и позволяющего регулировать частоту вращения в широких пределах. Этим

требованиям ранее удовлетворяли только коллекторные тяговые ДПП. Однако условия токосъема накладывают на эти машины ряд существенных ограничений. Кроме того, коллекторно-щеточный узел нуждается в частых осмотрах и профилактических ремонтах, в настройках, в определении и установлении областей безыскровой коммутации.

Интенсивное развитие элементной базы формирования схем силовой электроники позволяет говорить о снижении их стоимости, что, в свою очередь, позволяет значительно расширить диапазон их применения. В частности, стало возможным говорить об использовании схемных способов регулирования частоты вращения АД, установленных на электроподвижном составе. Их проектирование ставит ряд новых задач и, прежде всего, требуется понять некоторые закономерности регулирования, специфику работы преобразователя частоты и др. При этом при выборе режимов и эксплуатационно-конструктивных решений следует всегда помнить об особенностях работы самих АД. Например, то, что из всех типов двигателей они наиболее чувствительны к изменению напряжения: только у АД существует квадратичная зависимость от напряжения, подводимого к обмотке статора

$$U = \frac{m \cdot p \cdot R_2' \cdot U_1^2}{2\pi f_1 S [(R_1 + R_2' / S)^2 + (X_1 + X_2')^2]}, \text{ В,}$$

где  $m = 3$  – число фаз двигателя;  $p$  – число пар полюсов обмотки статора двигателя;  $R_1$  и  $R_2'$ , Ом – соответственно активное сопротивление обмотки статора и приведенное значение сопротивления обмотки ротора двигателя;  $U_1$ , В – напряжение, подводимое к обмотке статора;  $f_1 = 50$  Гц – промышленная частота сети;  $S$  – скольжение;  $X_1$  и  $X_2'$ , Ом – соответственно индуктивное сопротивление обмотки статора и приведенное значение сопротивления обмотки ротора двигателя.

Второй особенностью развития современного ЭП является интенсивное повышение технологических требований к динамическим показателям ЭП, расширение и усложнение его функций, связанных с управлением технологическими процессами, и соответствующее возрастание сложности систем управления ЭП. Их развитие идет по пути создания систем числового программного управления и расширения использования современной вычислительной техники, создаваемой непосредственно для целей управления на базе микропроцессоров. Необходимость применения аналоговых или микропроцессорных систем управления определяется конкретными технологическими требованиями к ЭП.

Железнодорожный транспорт является наиболее востребованным, доступным и надежным в Украине. Поэтому так важны работы, способствующие расширению сети железных дорог, внедрению современных достижений науки в совершенствование конструкций и схем управления электроподвижного состава. К таким решениям относятся вопросы продолжения электрификации железных дорог, изменение систем регулирования электротяги,

замена электрооборудования. На сегодня по территории Украины электрифицировано около 30% всей протяженности дорог, при этом электровозами выполняется более половины грузооборота, [1].

Простейшие по конструкции АТД с к.з. ротором при частотном регулировании полностью удовлетворяют условиям и требованиям электрической тяги. Однако лишь в последнее десятилетие появились возможности создания достаточно надежного преобразователя частоты для условий электрической тяги с использованием полупроводниковых приборов. Причем в этом направлении уже имеется значительный прогресс. Если первые образцы электроподвижного состава с АТД, созданные в 1970 – 1972 гг., использовались в основном для исследовательских целей и проверки исходных идей, то образцы электроподвижного состава, созданные в 1975 – 1980 гг., уже работали и продолжают работать в регулярной эксплуатации, [1]. Выявлены существенные преимущества АТП (электровозы Е1200 и Е120 в ФРГ, вагоны метрополитенов в Хельсинки, Берлине и других городах). АТП в скором времени заменит привод с использованием коллекторных ДПТ в тех приводах, где основной задачей является обеспечение достаточной регулировочной способности. К числу основных преимуществ АТП можно отнести:

1) высокая надежность АТД с короткозамкнутым ротором. Она определяется наличием на роторе практически неповреждаемой обмотки и возможностью использовать моторно-якорные подшипники с требуемой высокой долговечностью их работы;

2) повышенная надежность электрического оборудования системы преобразования энергии, а также устройства управления режимами работы тяговых двигателей. Она достигается благодаря резкому уменьшению контактных элементов, как в силовых цепях, так и в цепях управления;

3) жесткая механическая характеристика АТД в режиме буксования колес, что улучшает тяговые свойства электровозов;

4) резкое сокращение расхода меди при производстве тяговых двигателей. Как показывают расчеты, [2], расход меди на АТД может быть уменьшен по сравнению с расходом на коллекторный ДПТ в 2,5 – 3 раза при одинаковых значениях мощности и момента;

5) существенное уменьшение массы АТД по сравнению с массой тягового ДПТ при одинаковых параметрах. Отечественный и зарубежный опыт проектирования устройств тягового асинхронного привода (тепловоз ТЭ120 и электровоз Е120) показывает, что из-за уменьшения массы АТД можно получить массу системы «преобразователь частоты – АД» меньшую, чем масса коллекторного тягового ДПТ при той же мощности;

б) автоматизация процессов управления режимами работы АТД. Это преимущество позволит реализовать предельные возможности электровозов по сцеплению, повысить провозную способность участков с электрической тягой.

Перечисленные преимущества АТД, подтвержденные испытаниями и эксплуатацией опытных образцов электроподвижного состава, настолько существенны и очевидны, что перспективность такого тягового привода сомнений не вызывает. Тяговые двигатели относятся к числу наиболее напряженных по нагреву, механической прочности и токоприему среди всех типов электрических машин. Работа над ними не прекращается, новые решения внедряются постоянно. В том числе, ожидаются значительные изменения при положительном решении вопроса поиска новых источников электроэнергии. Независимо от того, когда конкретно появятся новые бестопливные, компактные и мобильные источники энергии нового поколения, их появление неизбежно. Это радикальным образом изменит ситуацию на рынке потребительского электрооборудования, в том числе и на рынке автоматизированного ЭП. Мы предполагаем, что основные моменты могут быть следующие:

1) центр тяжести основного объема продаж ЭП резко сместится в сторону ЭП малой мощности (до 10 кВт) для нужд индивидуального потребления.

2) ЭП средней мощности (от 10 до 100 кВт) найдут широкое применение в общественном ("электробусы") и железнодорожном транспорте, в малой авиации и на небольших судах речного и морского назначения. Здесь также следует ожидать "децентрализацию" энергоснабжения с переходом на групповой ЭП, где приводные двигатели будут устанавливаться на каждом колесе (оси в железнодорожных вагонах). Отсутствие контактной сети и необходимости токосъема ликвидирует надобность в локомотивах - приводным будет каждый вагон, [2, 3].

3) что касается ЭП с электродвигателями большой мощности, то, в связи с децентрализацией электрогенерирующих установок, сворачиванием тяжелой промышленности и закрытием крупных горнорудных предприятий, потребность в таких ЭП снижается.

4) Во многих приложениях (особенно в мобильных установках) доминирующим требованием к системе "источник энергии – ЭП" станет минимизация габаритно-весовых показателей, без учета КПД. В этой связи следует ожидать резкий рост потребности в быстроходных ЭП. С учетом показателей надежности здесь вне конкуренции окажутся частотно-регулируемые ЭП на базе АД с частотой вращения порядка 10-20 тыс.мин<sup>-1</sup>. Ожидается повышение спроса к ЭП с электрическими машинами нетрадиционного исполнения - линейными электрическими машинами, индукторным машинам, двигателям с когтеобразными полюсами и возбуждением от постоянных магнитов и т.д.

Работа и устройство статических преобразователей частоты достаточно полно рассмотрены в специальной литературе [1, 2]. Так, очень благоприятны для полупроводниковых преобразователей частоты тиристоры, запираемые по управляющему электроду, внедрение которых уже началось.

Возможные способы регулирования скорости асинхронного электропривода можно разделить на

три групи: 1) способы регулирования, при которых скольжение изменяется в широких пределах и потери, выделяющиеся в виде теплоты в элементах роторной цепи, пропорциональны скольжению; 2) способы, при которых скольжение АД при регулировании остается небольшим и не достигает критического скольжения на естественной характеристике; 3) способы, при которых скольжение при регулировании изменяется в широких пределах, но потери энергии скольжения в роторной цепи АД ограничены.

К первой группе способов регулирования скорости асинхронного ЭП относятся реостатное регулирование, регулирование изменением напряжения на статоре двигателя, наложение механических характеристик в 2-двигательном электроприводе, регулирование с помощью асинхронной муфты скольжения и др.

Изменение напряжения, как средство регулирования момента в разомкнутой системе, может быть использовано для регулирования скорости в системе автоматического регулирования по отклонению. Для этого схемы с тиристорным регулятором напряжения (ТРН) необходимо дополнить отрицательной связью по скорости. Рассмотрим основные показатели такого способа регулирования. Схема регулирования скорости асинхронного электропривода путем изменения напряжения на статоре приведена на рис. 1.

Здесь тиристорный регулятор напряжения обозначен РН, введен регулятор скорости (РС), выходное напряжение которого  $u_y$  воздействует на вход ТРН. На вход РС поданы сигнал задания  $i_{z.c}$  и сигнал обратной связи  $i_{o.c}$ , получаемый с якоря тахогенератора ТГ. В цепь управления РН введен сигнал смещения, с помощью которого при  $i_y = 0$  устанавливается минимальное напряжение на выходе РН. Практически в тиристорных РН для установки начального угла регулирования  $\alpha_0$  обычно имеются соответствующие подстроечные элементы.

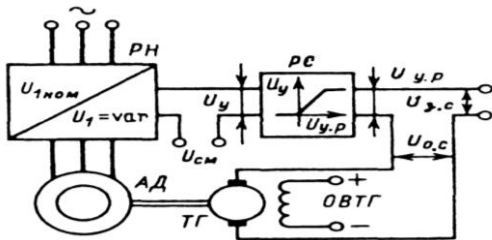


Рис. 1. Регулирование скорости в системе ТРН-АД

При оценке условий регулирования скорости в системе ТРН—АД необходимо учитывать, что напряжение на выходе ТРН несинусоидально, зависит от угла регулирования  $\alpha$  и от угла активно-индуктивной нагрузки  $\varphi_n$ , которой является АД для ТРН при определенном скольжении  $S$ . Электромагнитный момент двигателя определяется первой гармоникой напряжения, а влияние высших гармоник невелико, и им можно пренебречь. Поэтому для рас-

чета механических характеристик АД необходимо знать зависимость первой гармоники напряжения  $U_1$  от напряжения управления  $U_y$  при различных скольжениях  $S$  и соответственно различных  $\varphi_n$ .

Примерные зависимости  $U_1/U_{1ном}$  от  $U_y/U_{y,ном}$  для ряда значений  $\varphi_n$  приведены на рис. 2, причем в качестве  $U_{y,ном}$  принято напряжение, которое обеспечивает изменение угла  $\alpha$  от 0 до  $150^\circ$  при линейной характеристике  $\alpha = f(U_y)$ . Кривые построены при напряжении смещения  $U_{с.м.}$ , которое обеспечивает начальный угол  $\alpha_0 = 135^\circ$ . Эти характеристики существенно нелинейны и неоднозначны в связи со значительной зависимостью напряжения от угла нагрузки  $\varphi_n$ .

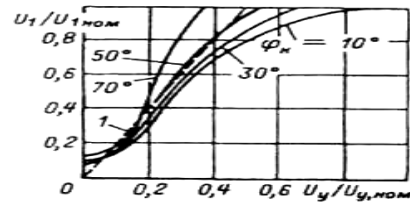


Рис. 2. Зависимости первой гармоники напряжения от сигнала управления в системе ТРН-АД

Зависимость угла нагрузки  $\varphi_n$  от скольжения можно получить, воспользовавшись упрощенной схемой замещения двигателя, приведенной на рис. 3.

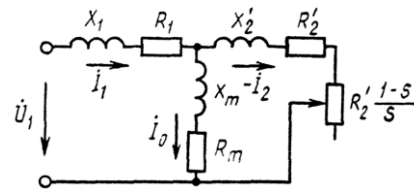


Рис. 3. Упрощенная схема замещения двигателя

$$\varphi = \arctg \frac{x_{эКВ}}{R_{эКВ}} = \arctg \frac{(R_{1\Sigma}S + R_2')^2 + x_K(x_{\mu} + x_K) \cdot S^2}{R_2' \cdot x_{\mu} \cdot S + R_{1\Sigma} \cdot x_{\mu} \cdot S^2}$$

где  $x_{эКВ}$  и  $R_{эКВ}$  — эквивалентные активное и индуктивное сопротивления двигателя, определяемые относительно  $U_1$  по схеме замещения;  $R_{1\Sigma}$  — суммарное активное сопротивление цепи статора, включая сопротивление фазы ТРН. Анализ уравнения показывает, что угол  $\varphi_n$  изменяется в функции скольжения быстро лишь при  $s < s_K$ , а при  $s_K < s < 1$  его изменения лежат в пределах  $40 - 60^\circ$ . Для этой области кривую  $U_x = f(U_1)$  можно линеаризовать, как показано на рис. 2 (прямая 1) и приближенно записать:

$$U_1 = k_{p.n.} * U_y = k_{p.n.} * k_{p.c.} (U_{z.c.} - k_{o.c.} * \omega);$$

$$k_{p.n.} = U_1 / U_y; \quad k_{p.c.} = U_y / U_{y.p.}; \quad k_{o.c.} = U_{o.c.} / \omega.$$

Так как момент АД пропорционален квадрату напряжения, можно записать:

$$M = M_c(s) * U_1^2, \quad \text{Нм}$$

где  $M_c(s)$  — момент при данном скольжении, определяемый по естественной механической характеристике двигателя, Нм;  $U_1^* = U_1 / U_{1ном}$  — относительное значение первой гармоники напряжения двигателя.

При работе с  $U_{3c} = \text{const}$  скорость двигателя в рабочей зоне механической характеристики поддерживается системой регулирования примерно постоянной, поэтому для режимов малых отклонений от точки статического равновесия можно линеаризовать:

$M = K_M \cdot U_1$ . Независимо от типа тягового двигателя на электроподвижном составе, должно быть обеспечено изменение силы тяги и мощности в соответствии с зависимостями, изображенными на рис. 4.

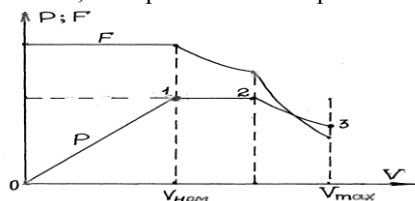


Рис. 4. Зависимости мощности  $P$  и силы тяги  $F$  от скорости  $V$

Точка 1 на рис. 4 соответствует номинальной мощности АТД  $P_{ном}$ , которая может поддерживаться до точки 2. При конструкционной скорости для грузовых электровозов обычно требуется мощность меньше номинальной, для пассажирских электровозов она близка к номинальной. Для электроподвижного состава конкретного типа т. 1 и 2 могут смещаться на оси скоростей. Точке 3 тоже может соответствовать различное значение мощности. Для тяговых ДПТ реализация значительной мощности при скорости  $v_{max}$  вызывает затруднения по условиям токосяема, для АТД этого ограничения нет.

Графики входных параметров АТД (рис. 5) характерны для грузового электровоза. Они весьма схожи с входными параметрами тяговых ДПТ при наличии плавного регулирования напряжения. Так же, как на электровозах с коллекторными ДПТ, выход на номинальное напряжение  $U_{х ном}$  осуществляется обычно на скорости  $v_{ном}$  или близкой к ней и для АТД. Из рис. 5 следует, что для АТД следует иметь, по крайней мере, два регулируемых параметра: напряжение  $U_1$  и частоту его  $f_1$ , которая примерно пропорциональна скорости движения и, желателен третий регулируемый параметр, например,  $f_2$ .

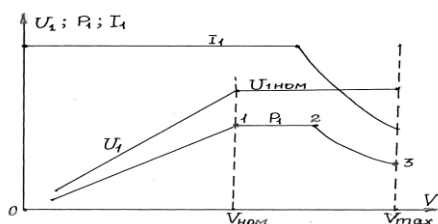


Рис. 5. Зависимости подводимой мощности  $P_1$ , фазного напряжения  $U_1$  и фазного тока статора  $I_1$  АТД от скорости движения

Для нерегулируемых АД разработана теория их работы в установившихся режимах. При условии  $U_1 = const$  и  $f_1 = const$  все параметры режима (мощность, момент, ток, коэффициент мощности, частота вращения) определяются для конкретной машины только значением скольжения. Длительная работа электроподвижного состава в любой точке тяговой области потребует изменения напряжения  $U_1$ , частоты  $f_1$ , момента  $M_2$ , магнитного потока  $\Phi_1$  и частоты  $f_2$ . В этих условиях большинство параметров схемы замещения становятся переменными, зависящими от потока, а также от частот  $f_1$  и  $f_2$ . В схему замещения должны быть введены переменные параметры.

Если частоту  $f_2$  сохранять неизменной, то уменьшение  $\Phi_1$  приведет к снижению тока в роторной и статорной обмотках, а, следовательно, и к снижению мощности. При этом момент будет снижаться пропорционально квадрату магнитного потока. Для поддержания мощности неизменной при скоростях ( $n_{ном} - n_{max}$ ) необходимо увеличивать частоту  $f_2$ , т.е. увеличивать скольжение.

## Выводы

1. Автоматизированный ЭП следует формировать с учетом требований электроэнергетики и с учетом уровня развития смежных областей: электромашиностроения, силовой электроники и средств обработки информации.

2. Развитие регулируемых ЭП переменного тока, использующих более простые АД, приведет к вытеснению регулируемых ЭП постоянного тока практически во всех сферах использования электротяги.

3. Важной особенностью развития современного ЭП является повышение технологических требований к динамическим показателям ЭП, расширение и усложнение его функций, связанных с управлением технологическими процессами.

4. При регулировании скорости в системе ТРН–АД необходимо учитывать, что  $U_1$  на выходе ТРН несинусоидально, зависит от угла регулирования  $\alpha$  и от угла R-L нагрузки  $\phi_n$ , которой является АД для ТРН при определенном скольжении  $S$ .

5. Электромагнитный момент АД определяется первой гармоникой  $U_1$ , поэтому для расчета механических характеристик необходимо знать зависимость первой гармоники напряжения  $U_1$  от напряжения управления  $U_y$  при различных скольжениях  $S$  и соответственно различных  $\phi_n$ .

6. Длительная работа электроподвижного состава в любой точке тяговой области потребует одновременного регулирования напряжения  $U_1$ , частоты  $f_1$ , момента  $M_2$ , магнитного потока  $\Phi_1$  и частоты  $f_2$ . При этом большинство параметров схемы замещения становятся переменными, зависящими от потока, а также от  $f_1$  и  $f_2$ . Т.е. в схему замещения должны быть введены переменные параметры и обычный математический аппарат не применим.

## Список литературы

1. Кузьмин В.В., Тимоценков В.Г. Проблемы электропривода и преобразовательной техники в свете тенденций развития энергетики в 21 веке // Сб. НПО «Электротяжмаш». – X., 2004.
2. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
3. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1966. – 280 с.
4. Этштейн И.И., Кривицкий С.О. Динамика частотного регулирования электроприводов с автономным инвертором. – М.: Энергия, 1970. – 91 с.

Поступила в редколлегию 30.03.2007

Рецензент: проф. Соляник В.П., Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

