

УДК 621.3.011.1

А.Т. Ерыгин, А.Ю. Охапкин

**К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ
ПЛАВКИХ ПРОВОЛОЧНЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ**

Семинар № 17

В о взрывозащищенном электрооборудовании для защиты электрических цепей от токов короткого замыкания используются плавкие проволочные предохранители. При перегорании они являются потенциальными источниками воспламенения взрывоопасной смеси. Для изоляции их от взрывоопасной среды их вместе с защищаемыми электронными блоками заливают термореактивным компаундом. При перегорании предохранителя в виду возможности его замены приходится заменять весь электронный блок. Такое техническое решение нельзя признать рациональным. Более эффективным решением является исключение плавкого предохранителя из числа источников воспламенения взрывоопасной смеси. Это может быть достигнуто путем разработки методики оценки взрывобезопасности плавких проволочных предохранителей. Для разработки методики оценки взрывобезопасности плавких проволочных предохранителей необходимо изучить воспламеняющую способность предохранителей. Проведенные до настоящего времени исследования воспламенения взрывоопасных смесей от перегорающих проволочек носят фрагментарный характер [1, 2, 3, 4]. Они не позволяют решить задачу оценки и обеспечения взрывобезопасности перегорающих проволочных предохранителей.

Для решения этой задачи в ИПКОН РАН был выполнен цикл научно-

исследовательских работ по изучению воспламенения представительных взрывоопасных смесей I, IIА, IIВ и IIС категорий взрывоопасности. На первом этапе были определены эмпирические зависимости допустимых токов и токов перегорания от диаметра и материала проволочки. Для проводников из меди:

$$i_{\text{доп.}}, \text{ А/мм}^2 = (17,68 + 26,87/d) \pm 10,17\% \quad (1)$$

$$i_{\text{пер.}}, \text{ А/мм}^2 = (23,42 + 55,3/d) \pm 9,58\% \quad (2)$$

где d – диаметр проволочки в мм.

На втором этапе определялись наиболее легко воспламеняемые концентрации (НЛВК) представительных взрывоопасных смесей при их поджигании перегорающими проволочками. В качестве электрического параметра, определяющего НЛВК использовался электрический ток. В результате проведенных исследований были определены наиболее легко воспламеняемые концентрации для смесей метана, пропана, этилена и водорода с воздухом. Их значения составили:

$$\text{для метановоздушной смеси –} \\ (7,0 \pm 0,25) \% \text{ об.;} \quad (3)$$

$$\text{для пропановоздушной смеси –} \\ (5,2 \pm 0,2) \% \text{ об.;} \quad (4)$$

$$\text{для этиленовоздушной смеси –} \\ (6,7 \pm 0,3) \% \text{ об.;} \quad (5)$$

$$\text{для водородовоздушной смеси –} \\ (13,3 \pm 0,5) \% \text{ об.;} \quad (6)$$

Дальнейшие исследования были направлены на определение параметра, од-

нозначно определяющего воспламеняющую способность перегорающих проводочек. Применение для этих целей электрического тока нереально вследствие зависимости его от геометрических размеров и материала проводника. Температура же зажигания газовой смеси зависит от размеров проводника, точнее от очага воспламенения [1, 2, 5]. Кроме этого измерение температуры микрообъектов, окруженных слоем горящего газа, пирометрическим методом возможно лишь с большими погрешностями [6]. Использование импульса энергии, предложенного в работе [4], связано с недостатками, обусловленными необходимостью измерения температуры воспламенения среды, а также геометрических и электрофизических параметров проводников. Ранее в результате проведенных исследований установлено, что критерием воспламеняющей способности нагретых тел малого размера является удельная воспламеняющая мощность. Используя этот критериальный параметр, была разработана методика оценки взрывобезопасности нагретых тел малого размера. Проанализируем возможность использования данного критериального параметра для оценки взрывобезопасности плавких проводочных предохранителей.

Воспламенение метановоздушной смеси происходило перегорающими проводочками при удельной воспламеняющей мощности, равной $(0,25 \pm 0,05)$ Вт/мм, вместо 2,0 Вт/мм для неперегорающих удлиненных нагретых проводников. Соответственно, для пропановоздушной, этиленовоздушной и водородовоздушной смесей удельная воспламеняющая мощность составила 0,21 Вт/мм, 0,20 Вт/мм и 0,18 Вт/мм. Очевидно, что воспламенение взрывоопасной смеси происходило не от всей

поверхности проводника, а от наиболее нагретой и расплавившейся его части. Мощность выделения энергии на этом участке проводника может быть определена из выражения

$$P = (\chi \nu \rho d^2) / 4\tau l \quad (7)$$

где χ , ν – удельная теплота плавления и плотность материала проводника; d , l – диаметр проводника и длина его расплавившегося участка; τ – время, за которое произошло расплавление участка проводника.

Используя выражение (7), была рассчитана удельная воспламеняющая мощность на перегоревшем участке проводника. Она составила 1,12 Вт/мм для метановоздушной смеси.

Феноменологически эта картина напоминает воспламенение взрывоопасной смеси от расходящихся нагретых контактов, которая изучалась З.М. Йохельсоном [6]. Применение удельной воспламеняющей мощности для оценки взрывобезопасности перегорающих проводочных предохранителей требует установления зависимости ее величины от температуры взрывоопасной среды.

В заключении следует отметить, что воспламенение взрывоопасных смесей от перегорающих проводников происходило при параметрах электрической цепи, когда электрический разряд мог возникнуть только за счет энергии, накопленной в индуктивности электрической цепи [8].

Таким образом, установив зависимость удельной воспламеняющей мощности от температуры нагрева взрывоопасной смеси при ее поджигании нагретыми телами малого размера, можно будет разработать алгоритм оценки взрывобезопасности плавких проводочных предохранителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
2. Иост В. Взрывы и горение в газах. М., Издательство иностранной литературы, 1952. 687 с.
3. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование условий воспламенения шахтной атмосферы от нагретых элементов электронных схем и разработка рекомендаций по их безопасному использованию». № государственной регистрации 01860118524. г. Люберцы, ИГД им. А.А. Скочинского, 1987. - 87 с.
4. Граевский М.М. Справочник по электрическому взрыванию зарядов ВВ. М., Рандеву-АМ, 2000. – 448 с.
5. Ерыгин А.Т., Трембицкий А.Л., Яковлев В.П. Оценка искробезопасности электрических цепей. – М.: Наука, 1976. – 304 с.
6. Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И. Температурные измерения. – Киев, Наукова думка, 1984. – 496 с.
7. Иохельсон З.М. Оценка искробезопасности нагреваемых элементов электрооборудования для взрывоопасных газовых сред. Безопасность труда в промышленности, № 11, 2001. – С. 24-25.
8. Петренко Б.А. Воспламеняемость газов и физические основы электровзрывобезопасности. – М.: Наука, 1989. – 150 с.

Коротко об авторах

Ерыгин А.Т. – профессор, доктор технических наук,
Охапкин А.Ю. – кандидат технических наук,
 ИПКОН РАН.



© Ю.П. Сташинов, Е.В. Крутиков,
2005

УДК 622.625-83:681.3.00.57(06)

Ю.П. Сташинов, Е.В. Крутиков

***ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
 В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ РУДНИЧНОГО
 АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА
 С РЕКУПЕРАТИВНЫМ ТОРМОЖЕНИЕМ***

Семинар № 17

Для привода рудничных электровозов предпочтительна механическая характеристика тяговых электродвигателей, мягкая при повышенных нагрузках и жесткая, с автоматическим ограничением скорости, в области малых и отри-

цательных нагрузок. Такую характеристику можно получить, осуществляя подпитку обмотки последовательного возбуждения тягового электродвигателя от низковольтного источника [1, 2].

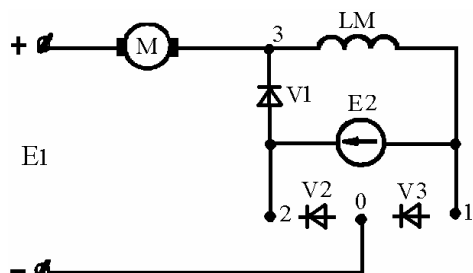


Рис. 1. Варианты привода с подпиткой

На рис. 1, 2 приведены схема, иллюстрирующая некоторые из возможных вариантов реализации такого технического решения, и соответствующие им тяговые характеристики.

Переключая точки 0 и 1, получаем схему 1 с подключением источника подпитки E2 параллельно обмотке возбуждения в тяговом режиме и последовательно – в режиме рекуперативного торможения.

Электромеханическая характеристика тягового двигателя для этого варианта имеет вид кривой FCAD (рис. 2). На участке FC диод V1 заперт падением напряжения на сопротивлении R12 обмотки возбуждения LM, и двигатель работает с последовательным возбуждением. При токе $I_c = E2/R12$ (точка C на рис. 2) диод отпирается, начинается подпитка обмотки возбуждения от источника E2, и двигатель переходит на более жесткий участок электромеханической характеристики CAD, аналогичной характеристике двигателя со смешанным возбуждением. Жесткость ее определяется соотношением сопротивлений обмотки возбуждения R12 и цепи источника подпитки R. В режиме пограничной скорости (точка A на рис. 2) ток возбуждения равен отношению $E/(R12+R)$.

Переключая точки 0 и 2, получаем схему 2 с подключением источника подпитки E2 последовательно обмотке возбуждения в тяговом режиме и параллельно – в режиме рекуперативного торможения.

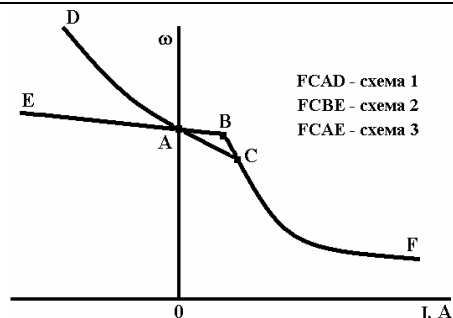


Рис. 2. Вид тяговых характеристик для обмотки возбуждения тягового двигателя различных вариантов подпитки обмотки возбуждения тягового электродвигателя

Электромеханическая характеристика тягового двигателя для данного варианта схемы имеет вид кривой FCBAE. На участке FB токи источника подпитки, возбуждения и якоря равны, поскольку они соединены последовательно. Диод V1 в этом случае отпирается при снижении тока до величины $I_B = E/(R12+R)$. При дальнейшем уменьшении тока якоря (участок BAE характеристики) токи возбуждения и источника подпитки остаются практически постоянными ввиду малости падения напряжения на диоде V1 в проводящем направлении. В результате этот участок характеристики подобен характеристике электродвигателя с независимым возбуждением.

Источник подпитки в 1-й схеме нагружается сравнительно небольшим током $I_s \leq I_B$ в двигательном режиме и суммарным током якоря и обмотки возбуждения в режиме рекуперативного торможения. Во 2-й схеме, наоборот, в двигательном режиме при работе на участке FB характеристики $\omega = f(I_A)$ через источник подпитки протекает полный ток якорной цепи, а при малых и отрицательных нагрузках (на участке BAE) ток источника подпитки сравнительно невелик, $I_s \cong I_B$.

Требуемую мощность источника подпитки можно существенно уменьшить, если в приведенной на рис. 1 схеме соединить отрицательный зажим источника пи-

тания E_1 (точка 0) с точкой 1 в двигательном режиме и с точкой 2 – в тормозном. Такое переключение можно обеспечить без использования контактных элементов введением в схему двух дополнительных полупроводниковых диодов V2 и V3 между точками 0 – 2 и 0 – 1, как показано на рис. 1. В результате получаем схему 3, с параллельным подключением источника подпитки к обмотке возбуждения как в двигательном, так и в тормозном режимах. Электромеханическая характеристика тягового двигателя в этом случае приобретает вид кривой FCAE, приведенной на рис. 2.

В данном сообщении приводятся результаты сравнительного исследования рассматриваемых вариантов схем в переходных процессах, в значительной степени определяющих качественные показатели тяговых электроприводов.

На рис. 3 приведена расчетная электрическая схема тягового электропривода для первого варианта. Она учитывает: индуктивности якоря $L_я$ и от потоков рассеяния L_s , нелинейность кривой намагничивания $i_\mu(\Phi)$, размагничивающую реакцию якоря $\lambda/|I_я|$, вихревые токи (эквивалентным контуром с сопротивлением R_k), нелинейную зависимость противо-ЭДС вращения от угловой скорости ω и магнитного потока Φ , нелинейность вольт-амперной характеристики диода (принята кусочно-линейная аппроксимация). Через R1, R2, R12, обозначены, соответственно,

активные сопротивления цепей якоря, источника подпитки и возбуждения.

На основании расчетной схемы составлена описывающая поведение электропривода в переходных режимах система нелинейных дифференциальных уравнений, дополненная уравнением равновесия моментов на валу тягового электродвигателя.

$$T_я \cdot \frac{d}{dt} I_{я*} + I_{я*} \cdot R_{1*} - I_{с*} \cdot R_{*} + E_{ян*} \cdot \omega_* \cdot \Phi_* = E_{1*} - E_{2*}$$

$$I_{с*} \cdot R_{*} + I_{f*} \cdot R_{12*} + T_s \cdot \frac{d}{dt} I_{f*} + T_\mu \cdot \frac{d}{dt} \Phi_* = E_{2*}$$

$$I_{с*} = I_{f*} - I_{я*}, \quad R_* = \begin{cases} R_{2*} & \text{при } i_* > 0 \\ R_{2*}' & \text{при } i_* < 0 \end{cases}$$

$$I_{f*} - \lambda \cdot |I_{я*}| - T_k \cdot \frac{d}{dt} \Phi_* = I_{\mu*}(\Phi_*)$$

$$T_m \cdot \frac{d}{dt} \omega_* = I_{я*} \cdot \Phi_* - M_c(\omega_*) \cdot \text{Sign}(\omega_*)$$

Уравнения записаны в относительных единицах. За базовые значения: для токов, магнитного потока Φ (потокосцепления ψ), моментов и угловой скорости ω приняты их номинальные значения, для сопротивлений $R_\delta = 1$ Ом, для напряжений $U_\delta = I_\delta \cdot R_\delta = I_n \cdot l$ Ом.

Инерционности электропривода характеризуются расчетными постоянными времени:

$T_я = L_я / R_\delta$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи электродвигателя;

$T_s = L_s / R_\delta$ – электромагнитная постоянная времени от потоков рассеяния;

$T_\mu = \psi_n / U_n$ – электромагнитная постоянная времени цепи намагничивания;

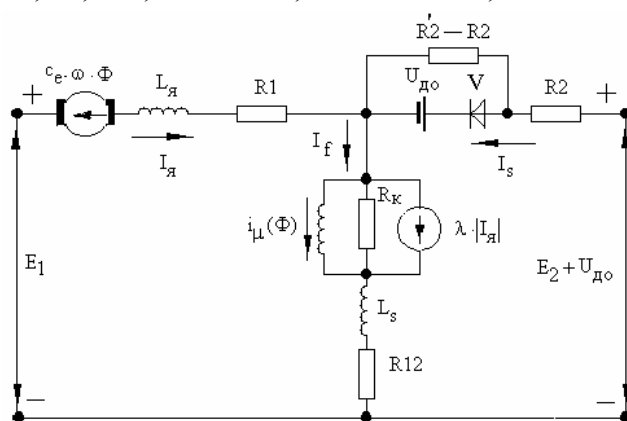


Рис. 3. Расчетная электрическая схема 1-го варианта привода

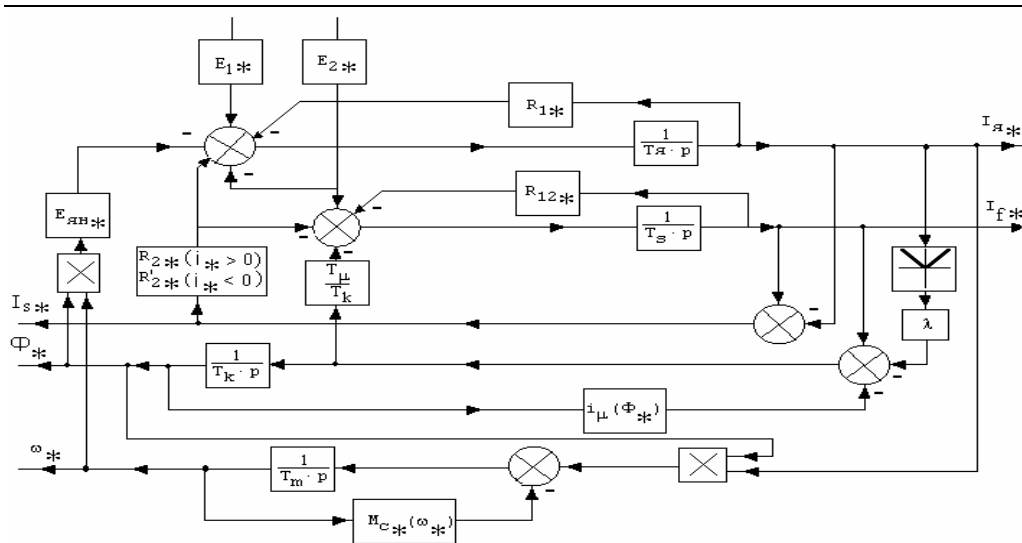


Рис. 4. Структурная схема 1-го варианта электропривода

$T_k = T_{\mu}/Rk^*$ - электромагнитная постоянная времени контура вихревых токов;

$T_m = J\omega/Mn$ - электромеханическая постоянная времени.

При исследовании электропривода приняты численные значения параметров тягового двигателя ЭДР-10П рудничного аккумуляторного электровоза 8АРП. Величины сопротивлений и некоторые другие параметры заимствованы из техниче-

ской характеристики двигателя и расчетного формуляра завода-изготовителя, величины электромагнитных постоянных времени были определены экспериментально. При разработке моделей была использована универсальная кривая намагничивания для тяговых электродвигателей [3].

Рассматриваемая электромеханическая система существенно нелинейная, с дис-

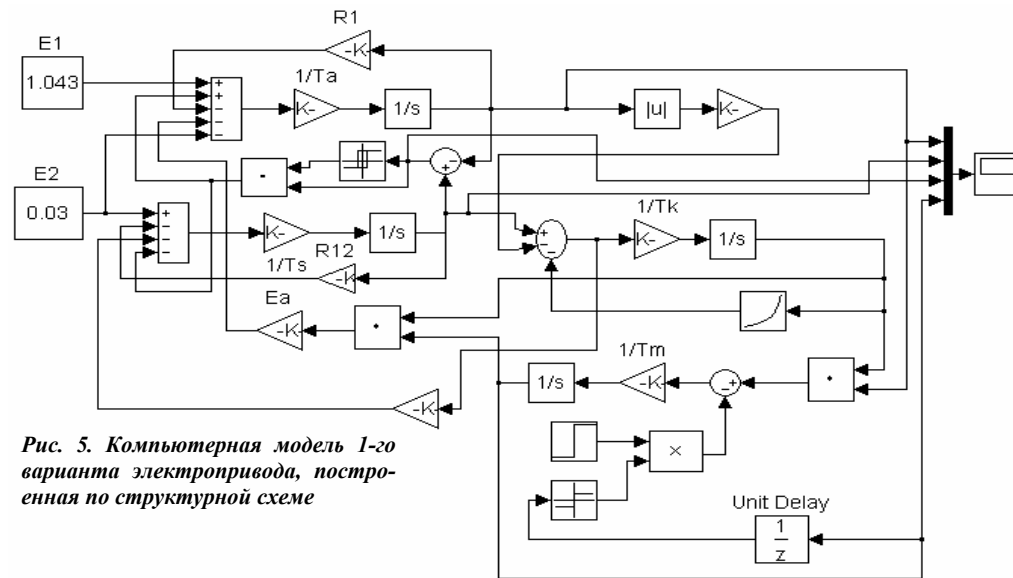


Рис. 5. Компьютерная модель 1-го варианта электропривода, построенная по структурной схеме

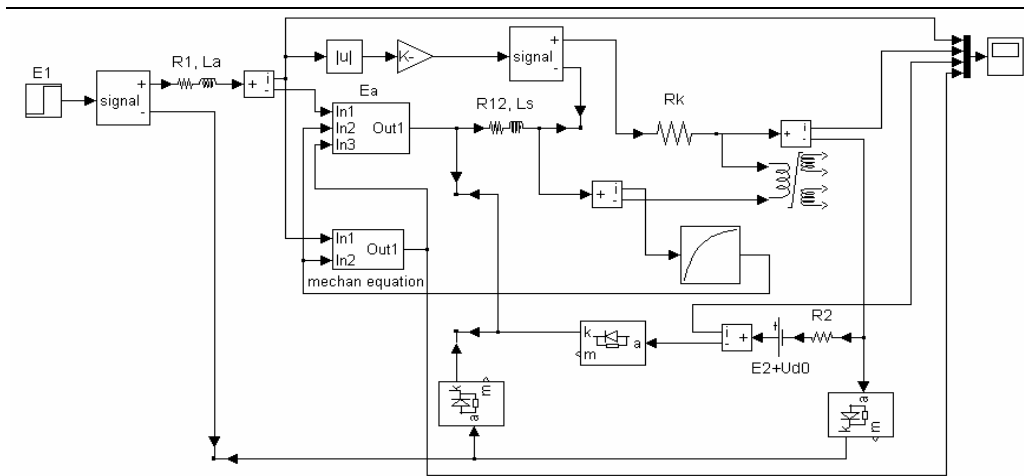


Рис. 8. Модель 3-го варианта электропривода с подпиткой обмотки возбуждения
Рис. 6. Модель 1-го варианта электропривода с подпиткой обмотки возбуждения

клетно изменяемыми параметрами и изменяемой структурой (из-за наличия диода, обладающего односторонней проводимостью), причем моменты изменения структуры и параметров определяются текущим состоянием самой системы.

С учетом сказанного, исследование ее возможно только численными методами. Удобным инструментом для этого представляется приложение *Simulink* математического пакета *MatLab*.

Компьютерную модель рассматриваемого электропривода в приложении *Simulink* можно сформировать двумя путями:

по структурной схеме на основании приведенной выше системы дифференциальных уравнений и непосредственно по расчетной электрической схеме с добавлением подсистемы моделирования уравнения движения. Ниже представлены оба из указанных подходов.

П На рис. 4 приведена структурная схема 1-го варианта электропривода, полученная на основе описания его системой дифференциальных уравнений, а на рис. 5 – соответствующая ей компьютерная модель в среде *MatLab*.

Аналогично могут быть построены мо-

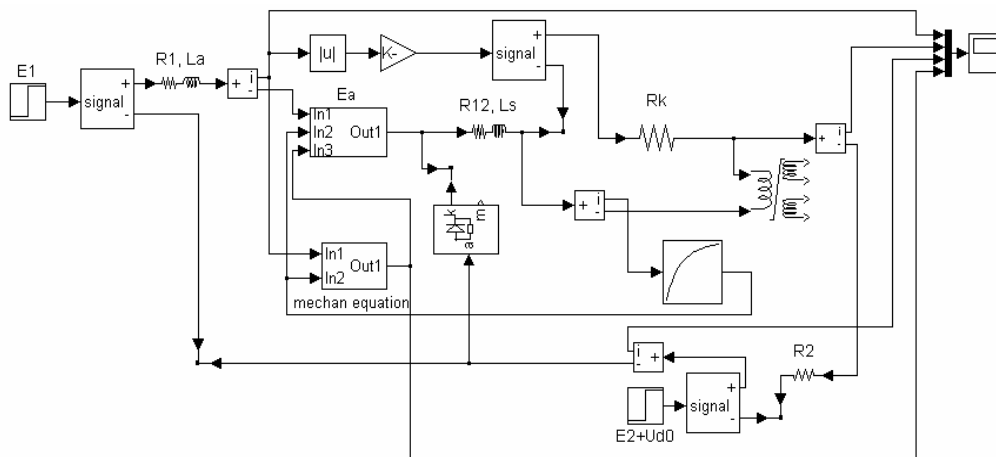


Рис. 7. Модель 2-го варианта электропривода с подпиткой обмотки возбуждения

дели для 2-го и 3-го вариантов электропривода на базе соответствующих уравнений динамики и структурных схем. Однако это достаточно трудоемкая процедура, особенно для 3-й схемы, где необходимо отслеживать условия перехода из непроводящего состояния в проводящее и обратно для трех полупроводниковых диодов.

По-видимому, более рациональным является построение компьютерных моделей непосредственно по расчетным электрическим схемам приводов с добавлением подсистемы моделирования механической

2. Пуск двигателя при тех же условиях со скачкообразным изменением через 1 с момента сопротивления от $M=1$ до $M=0,5$.

Процесс разгона до момента времени $t = 1$ с во всех вариантах электроприводов протекает аналогично и не имеет каких-либо особенностей, за исключением того, что в первой и третьей схемах ток источника подпитки практически равен нулю, тогда как во второй схеме равен току якоря. На втором участке (с момента времени $t=1$ с) характер переходного процесса для каждого из вариантов электропривода

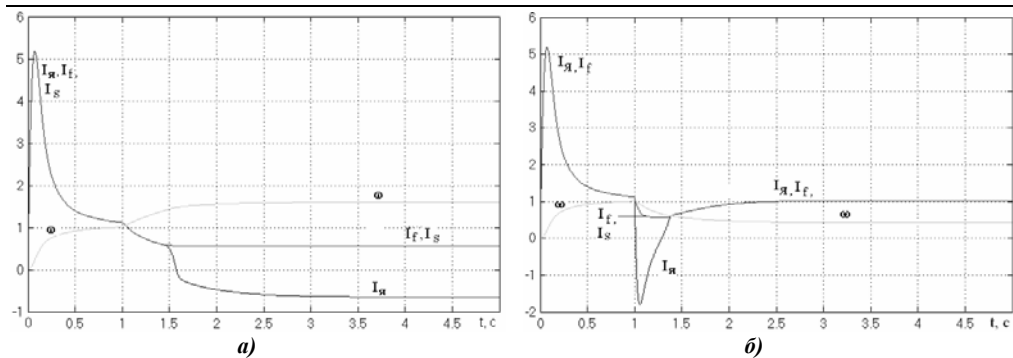


Рис. 10. Графики переходных процессов для 2-го варианта электропривода: а) – при скачке напряжения; б) – при скачке момента

части, аналогичной соответствующему фрагменту рис. 5. Заметим, что в принципе механическую подсистему также можно представить эквивалентной электрической схемой, так, как это делается, например, в известной программе моделирования PSpice.

Варианты полученных таким путем моделей приведены на рис. 6–8.

На разработанных моделях было проведено исследование предложенных вариантов тяговых электроприводов для следующих режимов работы:

1. Пуск тягового двигателя с номинальной нагрузкой подачей полного напряжения питания (в относительных единицах $E1=1,043$) с последующим скачкообразным снижением его через 1 с до величины $E1=0,5$.

имеет свои особенности.

На рис. 9 а, б приведены графики изменения во времени угловой скорости ω токов якоря I_a , возбуждения I_f и источника подпитки I_s для первой схемы с использованием модели (рис. 5), полученной по структурной схеме электропривода.

При скачкообразном снижении напряжения питания наблюдается кратковременный переход двигателя в режим рекуперативного торможения, сопровождающийся броском тока источника подпитки, через который в этом режиме протекает суммарный ток якоря и обмотки возбуждения. При снижении скорости и, соответственно, противо-ЭДС вращения электропривод возвращается в двигательный режим с нулевым током источника подпитки (диод V1 закрыт).

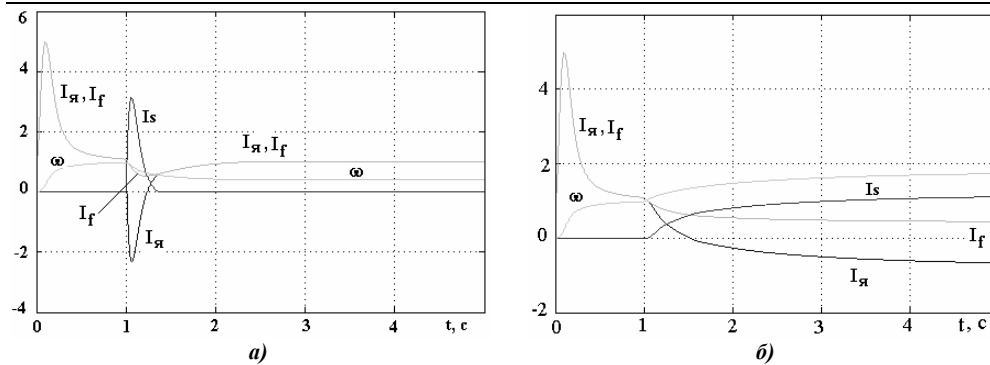


Рис. 9. Графики переходных процессов для 1-го варианта электропривода
 а) – при скачке напряжения; б) – при скачке момента

При изменении знака момента сопротивления продолжается разгон тягового двигателя с плавным (благодаря механической инерции) переходом в режим рекуперативного торможения с ростом тока источника подпитки.

Переходной процесс для первой схемы при использовании модели, полученный по схеме замещения (рис б), протекает практически аналогично, но с существенно большим временем моделирования.

На рис 10 а, б приведены результаты моделирования переходных процессов во

Изменения угловой скорости и тока якоря в ней имеют тот же характер, что и в предыдущих вариантах, но от источника подпитки потребляется сравнительно небольшой ток как в двигательном, так и в тормозном режимах работы привода. Выполненные исследования переходных процессов для трех вариантов тяговых электроприводов с подпиткой последовательной обмотки возбуждения двигателя от низковольтного источника через диод позволяют сделать следующие выводы:

1. Предложенные электроприводы

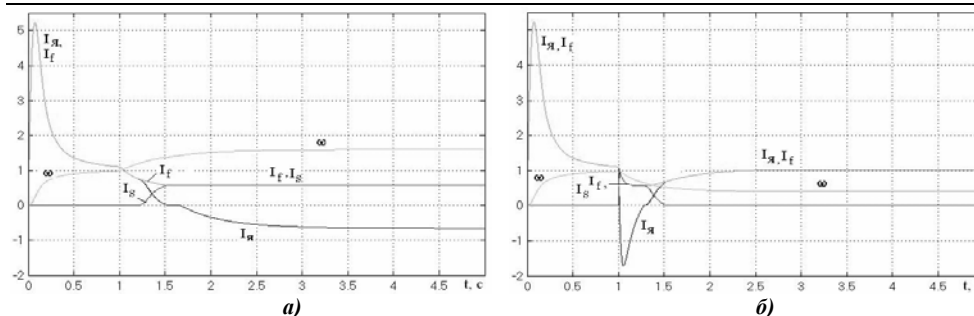


Рис. 11. Графики переходных процессов для 3-го варианта электропривода:
 а) – при скачке напряжения; б) – при скачке момента

втором варианте электропривода. В режиме рекуперативного торможения токи возбуждения I_f и источника подпитки I_s в этом случае стабилизируются, и двигатель работает при независимом возбуждении.

На рис 11 а, б приведены результаты моделирования для третьего варианта привода.

обеспечивают автоматическое ограничение скорости с переходом в режим рекуперативного торможения при изменении знака момента сопротивления (в случае готовности источника питания принять энергию рекуперации).

2. Переходные процессы в предложенных электроприводах, даже при зна-

чительных возмущающих воздействиях, протекают удовлетворительно.

3. При исследовании переходных процессов с использованием математического пакета *MatLab* предпочтительнее использовать более простые и легко модифицируемые модели, построенные по электрической схеме замещения электропривода, хотя при этом и снижается скорость моделирования в сравнении с реализацией моделей по уравнениям динамики.

4. Вариант электропривода с бесконтактным переключением источника подпитки при переходах из двигательного режима в тормозной и обратно минимизирует требуемую от него мощность, но за

счет использования дополнительных полупроводниковых диодов, усложняющих силовую схему.

5. Эффективное ограничение скорости в режиме рекуперативного торможения обеспечивает вариант электропривода с последовательным подсоединением источника подпитки к обмотке возбуждения в двигательном режиме, хотя он и требует по сравнению с другими вариантами наибольшей мощности источника подпитки.

6. Предложенные модели могут быть использованы для исследования широкого класса тяговых электроприводов в различных режимах их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Духопельников В.Д., Сташинов Ю.П. Совершенствование тяговых характеристик рудничных электровозов//Горная электромеханика и автоматика. –Харьков. 1966, № 6.- С. 124-129.

2. Сташинов Ю.П. Адаптивный привод шахтных электровозов. Горный информационно-

аналитический бюллетень, № 10, 2004. - С. 294 – 296.

3. Иоффе А.Б. Тяговые Электрические машины. –М.-Л.: Госэнергоиздат, 1965. – 236 с.

Коротко об авторах

Сташинов Ю.П. – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой,

Крутиков Е.В. – ассистент,

Шахтинский институт (филиал) ЮРГТУ (НПИ), кафедра «Электрификация и автоматизация производства».