

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА С ИМПУЛЬСНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Рак А.Н., канд.техн.наук, Следь Н.Н., канд.техн.наук,
Шавелкин А.А., канд.техн.наук,
Донецкий национальный технический университет

В статье представлены некоторые результаты моделирования динамических и установившихся режимов электропривода рудничного электровоза с электродвигателем типа ДРТ-13 с импульсным регулятором напряжения. При этом использована уточненная модель двигателя с учетом вихревых токов в стали полюсов. Показана возможность выполнения всех требований при использовании схемы на IGBT модулях на частотах коммутации $f > 1$ кГц, практически без увеличения потерь энергии в стали. При этом пульсации тока якоря не превышают 5% во всех режимах работы.

This article is concerned with the results of mining locomotive electric drive dynamic and fixed models modelling with the voltage pulse controlled DPT-13 electric motor. This involves the motor model adjusted to the vortical current in the poles steel. The scheme can conform to all the requirements if used at IGBT modules at $f > 1$ kHz communication frequency with power losses in stell brought to the minimum. Thus, the ancor current pulsing does not go over 5% at any operation mode.

Рудничная электровозная откатка является важным звеном технологического транспорта на шахтах. Эффективность ее работы напрямую связана с надежностью электроприводов.

В соответствии с принятыми нормативами [1] и на основе анализа возможных режимов работы необходимо сформулировать основные требования, при определении которых следует учитывать:

возможность длительной работы (15-20 мин.) на пониженных скоростях при маневровых и погрузочных операциях. Эти операции, кроме того, связаны с частыми пусками и торможениями;

наряду со статическим моментом сопротивления на привод действуют значительные динамические перегрузки, обусловленные значительными моментами инерции электровоза с присоединенными вагонетками. При этом суммарный момент инерции многократно

превышает момент инерции двигателя, это существенно затягивает процесс пуска во времени;

возможность пуска с полной загрузкой при движении на подъеме, когда момент сопротивления становится практически активным;

В соответствии с таким подходом можно сформулировать следующие основные требования к электроприводу электровоза:

- регулирование скорости электровоза от 0.5 до 3.5 м/с (значение 0.5 м/с соответствует скорости движения электровоза при разгрузке смешанных составов с донной разгрузкой);

- поскольку двигатель работает в тяжелых режимах, то обязательно токоограничение на уровне $2 \cdot I_{ном}$;

- регулирование не должно вызывать добавочных потерь на нагрев ДПТ;

- торможение с токоограничением в экстренных и рабочих ситуациях;

В настоящее время пуск и регулирование скорости тяговых двигателей постоянного тока (ДПТ) осуществляется с помощью контактно - реостатных систем и систем с импульсным регулированием, достоинства и недостатки каждой из которых известны и приведены в [1]. Системы с импульсным регулированием не нашли широкого применения в силу целого ряда причин. Так схемы с узлами конденсаторной принудительной коммутации тиристоров достаточно сложны и, как правило, имеют низкую надежность. Низкая частота коммутации, обусловленная низкочастотными свойствами тиристоров, вызывает значительные пульсации тока и соответственно момента двигателя. Кроме того наличие переменных составляющих тока ДПТ обуславливает дополнительные потери мощности на нагрев стали.

В настоящее время широкое распространение, в качестве ключевых элементов, получили IGBT – транзисторы, которые являются практически идеальными, полностью управляемыми ключевыми элементами. Они выпускаются в модульном исполнении на токи до 500 А и напряжение до 1700 В.

В связи с этим основной целью данной работы являлось исследование возможностей использования таких модулей при импульсном регулировании напряжения ДПТ. При этом схема управления имеет достаточно простой вид (рис.1). В качестве регулирующего используется транзистор VT1. При этом регулирование напряжения, подаваемого на двигатель осуществляется методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Обратный диод VD2 используется

для замыкания тока нагрузки на интервалах времени, когда VT1 заперт.

В качестве базового может быть использован модуль типа GA500ТД60U на напряжение $U_{кэ}=600$ В и ток $I=500$ А. Допустимый ток нагрузки при частотах коммутации (1-3 кГц) не менее 200 А, что достаточно при включении двух двигателей параллельно и токоограничении $2I_{ном.дв}=100$ А.

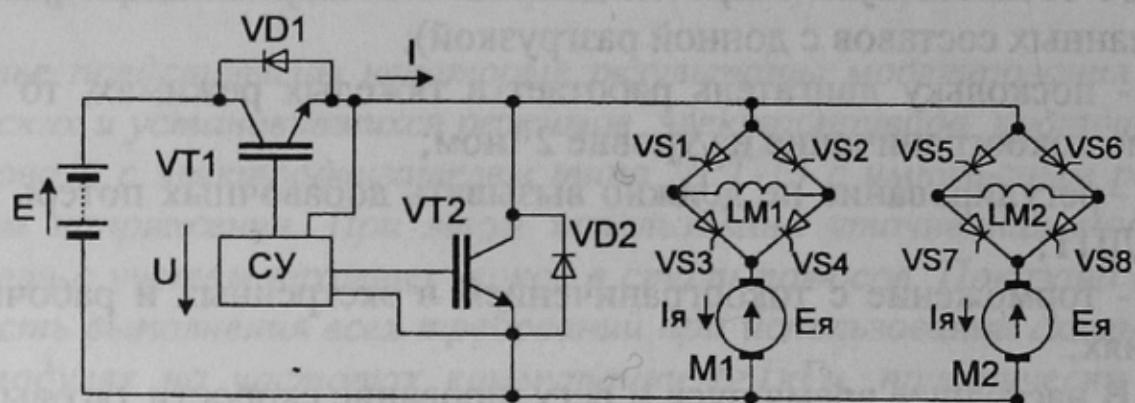


Рисунок 1- Схема управления с применением IGBT- транзисторов E-аккумуляторная батарея; VT1, VT2-IGBT-транзисторы; VD1, VD2-диоды; CU-система управления транзисторами; VS1-VS4, VS5-VS6 -тиристоры; LM1, LM2- обмотки возбуждения двигателей; M1, M2 - двигатели

Реверс в схеме бесконтактный и обеспечивается изменением направления тока возбуждения. Для этого использованы мостовые схемы с тиристорами VS1-VS4, VS5-VS8. Тиристоры VS1, VS4 – обеспечивают прямое направление движения, VS2, VS3 – обратное. Использование модулей с встречно-параллельным включением диода имеет следующие положительные моменты. Встроенные диоды по характеристикам и частотным свойствам хорошо согласованы с транзисторами, что благоприятно сказывается на процессе коммутации. Диод VD1 не используется, транзистор VT2 может использоваться для импульсного регулирования в тормозных режимах, что является предметом дополнительных исследований и в данной статье не рассматривается.

ДПТ последовательного возбуждения имеют следующие особенности. Включение обмотки в силовую цепь, мощность которой на два порядка выше, чем мощность цепи возбуждения, создает условия для форсированного изменения потока двигателя. При этом анализ динамических свойств двигателя без учета влияния вихревых токов, наводящихся в полюсах и станине при быстрых изменениях потока, приводит в большинстве случаев к значительным ошибкам [2].

Влияние вихревых токов может быть учтено введением «фиктивной» короткозамкнутой обмотки. С учетом этой обмотки математическое описание динамического процесса преобразования энергии в двигателе с последовательным возбуждением имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= i_{B.T} \cdot R_{B.T} + \omega_{B.T} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ u_{Я} &= k \cdot \Phi \cdot \omega + i_{Я} \cdot R_{Я\Sigma} + L_{Я} \cdot \frac{di_{Я}}{dt} + \omega_{B} \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \\ M &= k \cdot \Phi \cdot i_{Я}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $R_{Я\Sigma}$ - суммарное сопротивление цепи якоря, включает в себя сопротивление обмотки якоря $R_{Я}$ и обмотки возбуждения R_{OB} ($R_{Я\Sigma} = R_{Я} + R_{OB}$), Ом;

$L_{Я}$ - индуктивность обмотки якоря, Гн;

$u_{Я}$ - напряжение на зажимах якоря, В;

M - электромагнитный момент двигателя, Нм;

ω_{B} - количество витков обмотки возбуждения;

k - постоянная двигателя;

$i_{Я}$ - ток обмотки якоря, А;

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{Я\Sigma} T_{B\Sigma}}{K_{\Phi}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} &= u_{Я} - E - T_{Я} \cdot R_{Я\Sigma} \cdot \frac{di_{Я}}{dt} - \frac{R_{Я\Sigma}}{K_{\Phi}} \cdot \Phi; \\ T_{Я} R_{Я\Sigma} \frac{di_{Я}}{dt} &= u_{Я} - E - \frac{T_{B} R_{Я\Sigma}}{K_{\Phi}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} - R_{Я\Sigma} i_{Я}; \\ M &= K_{\Phi} i_{Я}; E = K_{\Phi} \omega; \\ M - M_C &= J_{ПР} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

После несложных преобразований уравнения могут быть преобразованы к удобному для моделирования виду и дополнены уравне-

нием движения.

В результате имеем:

$T_{Я} = L_{Я} / R_{Я}$ - постоянная времени якорной цепи, с;

$T_{B} = K_{\Phi} \omega_{B} / R_{Я\Sigma}$ - постоянная времени обмотки возбуждения, с;

$T_{B\Sigma}$ - постоянная времени обмотки возбуждения с учетом влияния вихревых токов в стали и по рекомендациям [2], может быть

вать переходные процессы пуска и работы в установившихся режимах.

САР выполнена по известным принципам с токовой отсечкой на уровне $2I_{ном}$.

На рис.3 показан пуск ДПТ с номинальным моментом и частотой коммутации 100Гц. Из осциллограммы на рис.3 видно, что в процессе разгона значение тока ограничивается на уровне $2I_{ном}$. При работе с номинальной скоростью (или близкой к ней) вопрос об ограничении пульсаций тока $I_{я}$ не возникает, поскольку работа двигателя происходит практически с номинальным напряжением или близким к нему. Пульсации тока не являются лимитирующими с учетом времени разгона. Проблема пульсаций возникает при движении с малыми скоростями.

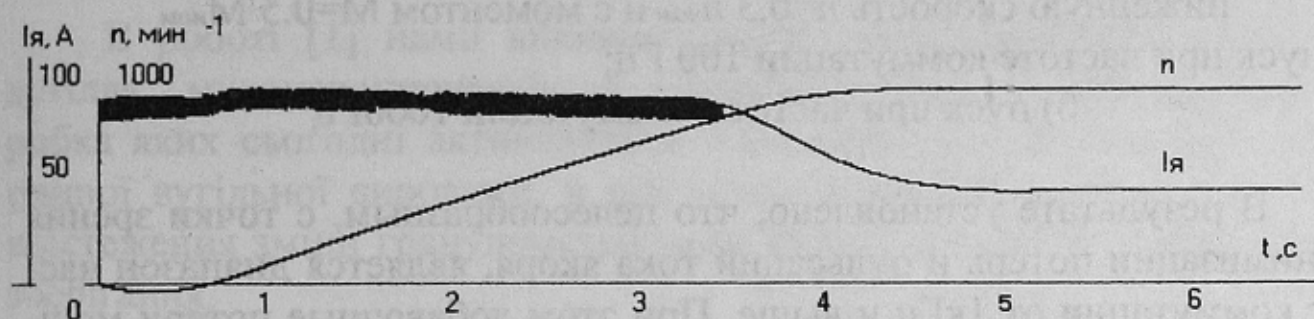


Рисунок 3 - Осциллограмма процесса пуска электропривода до номинальной скорости $n = n_{ном}$ и с моментом $M = M_{ном}$

Исследования проведены при разных значениях частоты коммутации, различных значениях и характере нагрузки, при различных значениях скорости и приведены на рис.4.

Для сравнительного анализа и учета дополнительных потерь, возникающих при импульсном регулировании рассматривался вариант с «гладким» регулированием напряжения ДПТ. Тогда дополнительные потери мощности на нагрев ΔP могут быть определены как разность мощности, потребляемой от источника при импульсном и «гладком» регулировании при прочих равных условиях (M_c , $I_{пр}$, ω и одинаковых настройках САР). Для удобства анализа определялось количество тепла: $Q = \int \Delta P dt$.

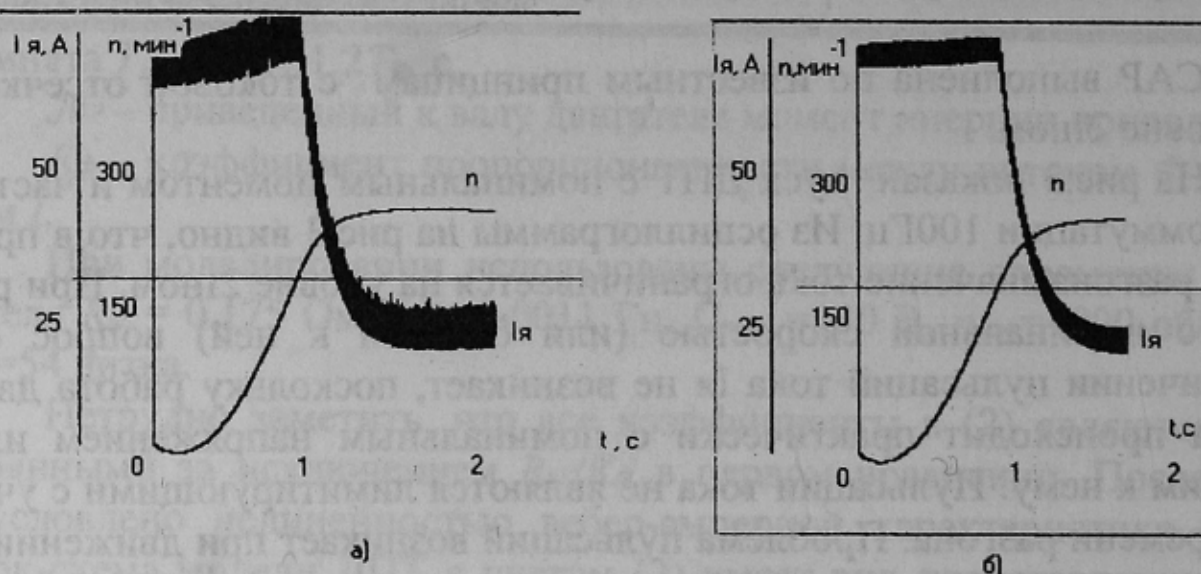


Рисунок 4 - Осциллограммы процесса пуска электропривода на пониженную скорость $n=0.3 n_{ном}$ и с моментом $M=0.5 M_{ном}$

а) пуск при частоте коммутации 100 Гц;

б) пуск при частоте коммутации 1000 Гц

В результате установлено, что целесообразным, с точки зрения минимизации потерь и пульсаций тока якоря, является диапазон частот коммутации от 1кГц и выше. При этом добавочные потери мощности не превышают 5% от номинальной мощности, а пульсации тока якоря находятся в пределах 3-5%. При окончательном выборе частоты следует учитывать уровень влияния и возможность фильтрации высокочастотных помех, обусловленных работой регулятора.

Список источников:

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. 4-е изд., перераб. И доп. М.: Недра. 1981. 389с.
2. Чиликин М.Г. и др. теория автоматизированного электропривода: Учеб. Пособие для вузов/ Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С. – М.: Энергия. 1979.-616с., ил.