

I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.222:62-83

П. Д. Андриенко, С. И. Шило, А. О. Каплиенко, И. Ю. Немудрый

Исследование динамики серийного электродвигателя с различными импульсными схемами регулирования

Разработана усовершенствованная схема импульсного регулирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Для предложенной и существующей схем импульсного регулирования разработаны имитационные модели, с помощью которых исследованы электромеханические процессы тягового электропривода и выполнен их сравнительный анализ.

В настоящее время в электротранспорте широко применяются электроприводы постоянного тока с двигателями последовательного возбуждения (ДПВ). Область применения указанных электроприводов достаточно широка – в тяговом электроприводе (ТЭП) подвижного состава городского и железнодорожного транспорта. Это связано с тем, что изменение момента нагрузки для данных механизмов хорошо согласуется с электромеханической характеристикой ДПВ. Важным фактором повышения рентабельности работы электротранспорта в целом может стать замена существующего ТЭП на более современные их виды.

К основным существующим схемам регулирования скорости ДПВ относятся реостатная и импульсная схемы [1, 2]. Тяговый электропривод с реостатной схемой регулирования скорости ДПВ малоэффективен, поскольку имеет такие известные недостатки [1]:

- наличие большого количества контактной аппаратуры;
- потери в пусковых резисторах, снижающие КПД тягового электропривода;
- необходимость проведения регулярной диагностики и частого технического обслуживания, что повышает затраты на эксплуатацию подвижного состава.

С развитием силовой электроники появились более эффективные импульсные схемы регулирования скорости вращения ДПВ, исключающие до минимума применение контактной аппаратуры и снижающее потребление электроэнергии в режимах пуска, торможения и выбега ТЭП. При этом классическая импульсная схема регулирования [2] является более экономичной,

но в режиме электромагнитного торможения требует установки в ней дополнительного оборудования. Поэтому большой практический интерес представляют схемные решения, позволяющие использование электродинамического торможения при самовозбуждении электродвигателя. Однако, использование данного режима связано с определенными сложностями, так как при торможении требуется наличие остаточного магнитного потока в двигателе. В существующих схемах электропривода для этой цели применяются дополнительные независимые источники тока, использование которых приводит к усложнению схемного решения и дополнительному расходу электроэнергии, а также к увеличению затрат на ремонт и обслуживание данного устройства. В связи с этим актуально и остро востребовано практикой дальнейшее совершенствование схем импульсного регулирования и, особенно, – в части упрощения этих схем при сохранении требуемого качества регулирования электромеханических процессов тягового электропривода.

Целью статьи является создание усовершенствованной схемы импульсного регулирования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения, исследование с применением предложенной схемы электромеханических процессов упомянутого двигателя и сравнение их с процессами в существующих схемах регулирования.

Авторами предложена усовершенствованная схема импульсного регулирования скорости ДПВ, показанная на рис. 1, а. Она отличается от классической схемы импульсного регулирования, представленной на

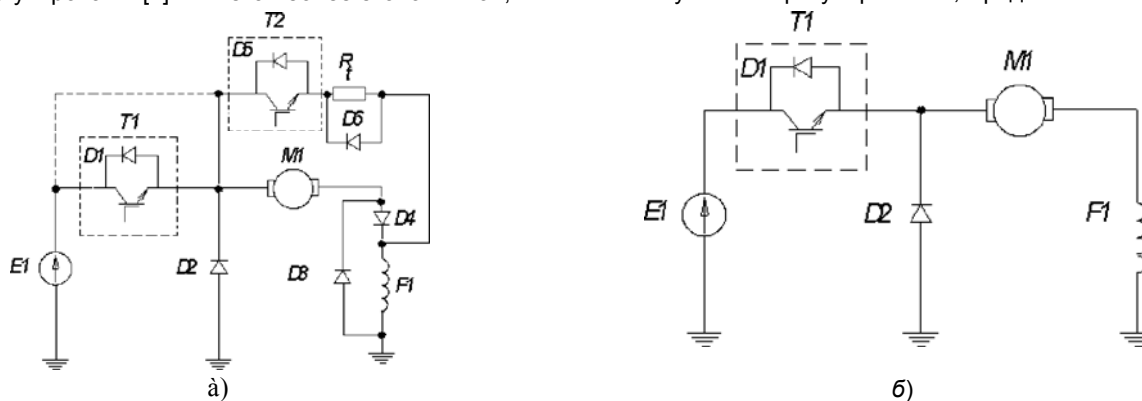


Рис. 1. Схемы импульсного регулирования скорости ДПВ: а) усовершенствованная; б) классическая

рис. 1, б, тем, что в ней дополнительно содержатся: диод $D3$, шунтирующий обмотку $F1$ возбуждения ДПВ; диод $D4$, включенный последовательно с обмоткой $F1$ возбуждения ДПВ. Данные элементы предназначены для осуществления электродинамического торможения при самовозбуждении ДПВ.

Для проведения исследований электромеханических процессов в предложенной схеме авторами была

разработана имитационная модель, показанная на рис. 2. Исследование проводилось с помощью программного пакета Matlab 2006 при применении библиотеки SimPowerSystem [3–5]. При моделировании не учитывалось влияние реакции якоря. Нелинейность кривой намагничивания учитывалась таблично согласно методики, приведенной в [6].

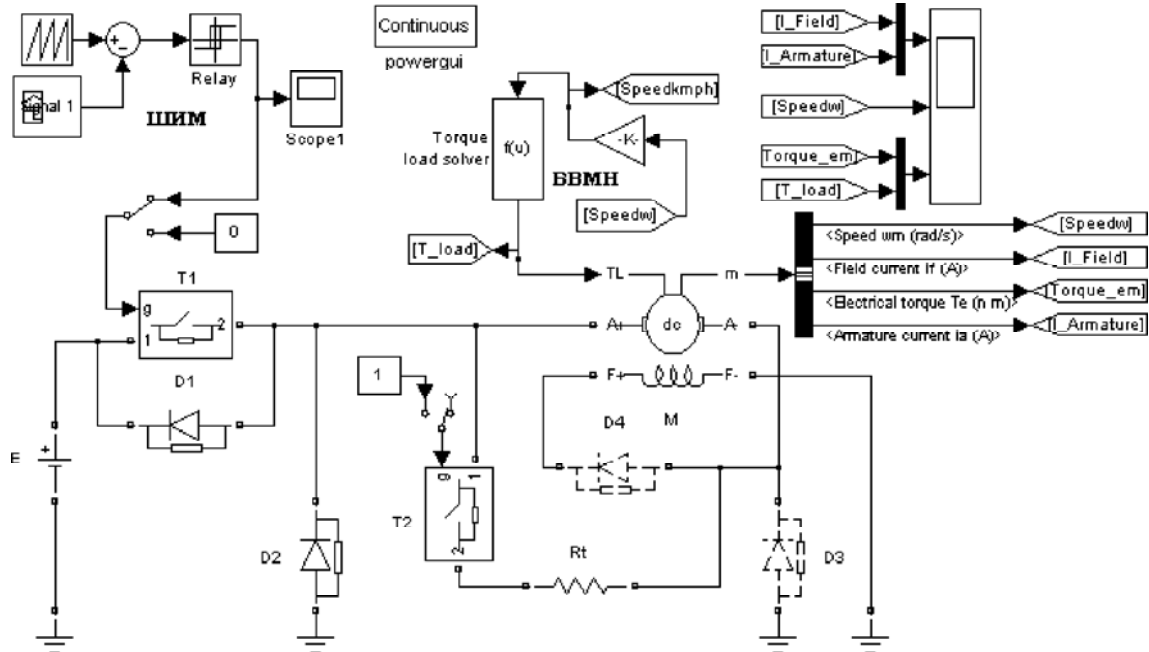


Рис. 2. Модель усовершенствованной схемы импульсного регулирования скорости ДПВ

Приведем описание элементов модели:

E – источник питания (напряжение источника питания равно 750 В);

$T1$ – силовой ключ;

$T2$ – силовой ключ, включающий тормозной резистор R_t ;

$D2$ – диод обратного тока;

M – двигатель постоянного тока последовательно-возбуждения;

ШИМ – блок широтно-импульсной модуляции, реализующий управление силовым ключом $T1$;

БВМН – блок вычисления момента нагрузки двигателя M ;

$D3, D4$ – диоды, вводимые в схему при исследовании усовершенствованной схемы импульсного регулирования частоты вращения двигателя (показаны в схеме на рис. 2 пунктиром).

Параметры имитационной модели рассчитывались для двигателя 1ДТ-003.5У [7] по методике, приведенной в [5]. Технические характеристики тягового двигателя 1ДТ-003.5У:

- номинальное напряжение $U = 750$ В,
- мощность $P = 235$ кВт,
- сила тока $I = 345$ А,
- частота вращения $n = 1250$ мин⁻¹,
- масса $m = 2300$ кг.

Все дальнейшие расчеты и графики рассчитанных зависимостей приведены в относительных единицах.

За базовые значения приняты следующие:

- электромагнитный момент $M = 5$ кН*м;
- угловая частота вращения $\omega = 130$ рад/с;
- ток $I = 345$ А.

В классической схеме импульсного регулирования [2] скорость затухания тока якоря определяется постоянной времени якорной цепи. На участке схемы: силовой ключ $T1$ - обмотка якоря $M1$ - обмотка возбуждения $F1$, – ток якоря нарастает, когда ключ $T1$ открыт. Якорный ток спадает по цепи: диод $D2$ - обмотка якоря $M1$ - обмотка возбуждения $F1$, когда ключ $T1$ закрыт.

При введении в усовершенствованную схему диода $D3$ (рис.1,а) ток возбуждения будет протекать по контуру: шунтирующий диод $D3$ – обмотка возбуждения $F1$, – что позволяет исключить протекание общего тока в якоре и обмотке возбуждения. Скорость нарастания (спадания) тока в обмотке якоря ДПВ из-за наличия диода $D3$ определяется только параметрами цепи якоря.

Из анализа изменения постоянных времени отдельных контуров рассчитаны для рассматриваемого тягового двигателя соотношения:

$$T_{я} / T_{\Sigma} = 0,6 \text{ и } T_{в} / T_{\Sigma} = 1,5,$$

где

$$T_{\Sigma} = T_{я} + T_{в} \quad (1)$$

суммарная постоянная времени обмоток якоря и возбуждения.

Значения постоянных времени обмоток якоря и возбуждения находятся из зависимостей:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{я}} &= \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \\ T_{\text{в}} &= \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $L_{\text{в}}$ и $L_{\text{я}}$ – индуктивности обмоток возбуждения и якоря соответственно; $R_{\text{в}}$ и $R_{\text{я}}$ – активное сопротивление обмоток возбуждения и якоря соответственно.

Полученные соотношения показывают, что для исследуемого двигателя постоянные времени обмотки возбуждения и якорной цепи отличаются примерно в 3,3 раза. Изменение тока возбуждения для классической и усовершенствованной схем показано на рис. 3. Из проведенных исследований следует, что усовершенствованная схема позволяет осуществить электродинамическое торможение с самовозбуждением без дополнительных источников питания.

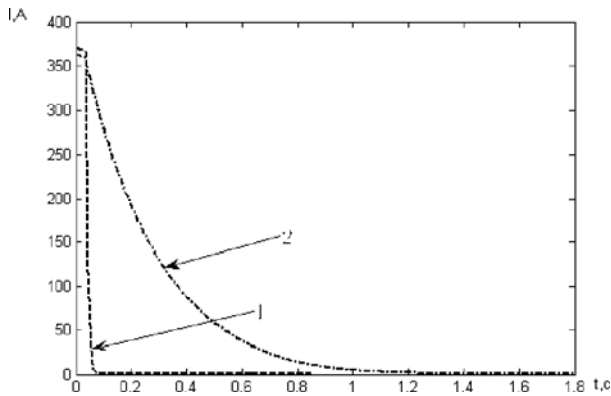


Рис. 3. График спада тока в обмотке возбуждения: 1 – без диода D3; 2 – с диодом D3

Изменение взаимного соотношения постоянных времени обмоток якоря и возбуждения приводят в усовершенствованной схеме к увеличению пульсаций тока в якорной цепи в $T_{\Sigma}/T_{\text{я}}$ раз (в нашем случае – в 2,1 раза согласно рис. 6 и рис. 7). Для сохранения неизменными значений пульсаций тока якоря необходимо соответственно увеличить частоту коммутации ключа T1. В свою очередь, данное увеличение частоты коммутации вызывает увеличение среднего значения тока в обмотке возбуждения (до амплитудного значения тока якорной цепи).

Проведенные исследования создают предпосылки реализации такого схемного решения, которое позволит уйти от использования дополнительных независимых источников тока для обмотки возбуждения тягового электродвигателя (при переходе из режима движения под током в режим электродинамического торможения). Это повышает эффективность использования электрической энергии и снижает затраты на эксплуатацию и ремонт независимого источника тока.

Дополнительно были разработаны имитационные модели реостатной (рис. 4) и классической схемы импульсного регулирования. Моделирование классической схемы [2] (в которой импульсное регулирование скорости ДПВ осуществляется с помощью изменения скважности работы ключа T1 в схеме на рис. 1, б) выполнялось на базе ранее созданной имитационной модели, показанной на рис.2.

Результаты моделирования электромеханических процессов при разгоне ДПВ приведены: на рис. 5 (для реостатной схемы), на рис. 6 (для классической схемы) и рис.7 (для усовершенствованной схемы), где $I_{\text{а}}$ – ток якоря двигателя; $I_{\text{в}}$ –ток возбуждения двигателя; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент двигателя; ω – угловая частота вращения двигателя.

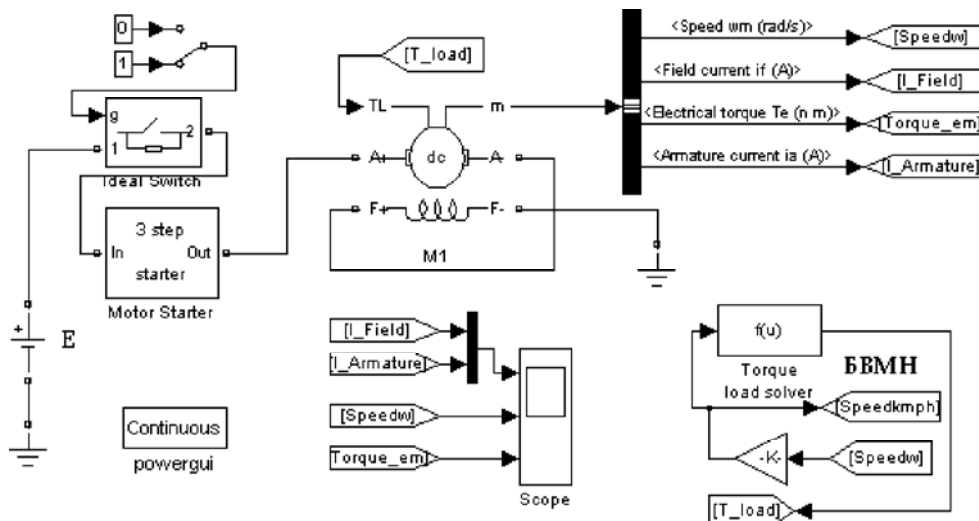


Рис. 4. Модель реостатного пуска серийного электродвигателя: E – источник питания (напряжение источника питания равно 750 В); Motor Starter – пусковой реостат, обеспечивающий 4 ступени регулирования; M1– двигатель постоянного тока последовательного возбуждения; БМН – блок, вычисления момента нагрузки двигателя M1.

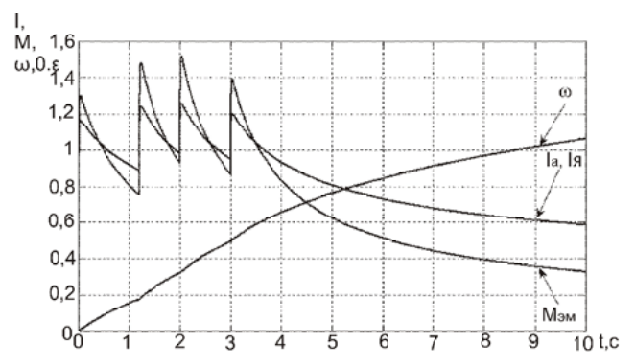


Рис. 5. Электромеханические процессы разгона для реостатной схемы пуска ДПВ

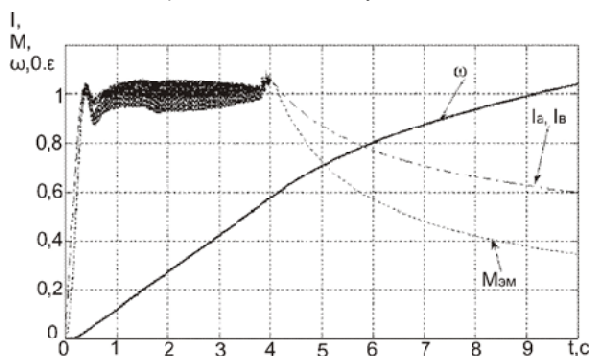


Рис. 6. Электромеханические процессы разгона для классической импульсной схемы регулирования скорости ДПВ (частота коммутации 300 Гц)

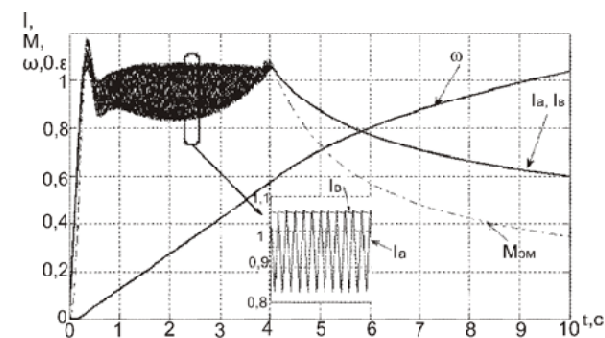


Рис. 7. Электромеханические процессы разгона для усовершенствованной импульсной схемы регулирования скорости ДПВ (частота коммутации 300 Гц)

На рис. 8 представлены результаты исследования усовершенствованной импульсной схемы регулирования скорости ДПВ в режимах разгона, выбега и электродинамического торможения. При моделировании задавались следующие режимы:

- частота модуляции $f_m = 1500$ Гц;
- в момент времени $t=0$ начат разгон электродвигателя;
- в момент времени $t=8,6$ с отключается подача питания на двигатель, после чего осуществляется режим выбега;
- в момент времени $t=9,2$ с посредством включения силового ключа T_2 в якорную цепь вводится тормозной резистор R_t (который подключен до полной остановки якоря электродвигателя).

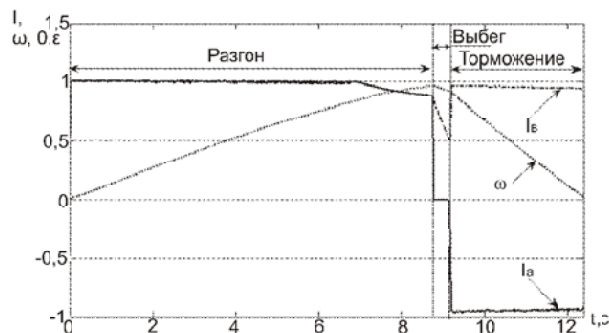


Рис. 8. Электромеханические процессы для усовершенствованной импульсной схемы регулирования скорости ДПВ в режимах движения, выбега, электродинамического торможения

Авторами были проведены исследования усовершенствованной схемы при различных частотах коммутации силового ключа T_1 : в диапазоне от 300 до 1500 Гц. Из результатов исследований следует вывод, что на практике достаточное снижение уровня пульсаций тока якоря достигается повышением частоты коммутации до 1–1,5 кГц. Также снижение уровня указанных пульсаций тока удается возможно достичь при введении в якорную цепь сглаживающих элементов (таких, как сглаживающий реактор или конденсатор). Необходимо отметить, что при размыкании ключа T_2 запасенная энергия в обмотке якоря ДПВ возвращается в источник питания (то есть, происходит режим рекуперации энергии, запасенной в якорной цепи), вследствие чего схема становится более экономичной.

Выводы

1. Предложенное усовершенствование схемы импульсного регулирования (заключающееся во введении в схему диодов D_3 и D_4) позволяет использовать режим электродинамического торможения и рекуперации при самовозбуждении электродвигателя без применения дополнительных независимых источников тока, и, следовательно, – тем самым упростить техническую реализацию и уменьшить дополнительные затраты.
2. Разработаны имитационные модели, предназначенные для исследования электромеханических процессов в серийном двигателе постоянного тока при предложенной и существующих схемах импульсного регулирования.
3. Проведенное моделирование позволило выполнить сравнительный анализ предложенной и существующей схем импульсного регулирования, исходя из которого установлено, что усовершенствованная схема является наиболее эффективной.
4. Результаты исследования усовершенствованной схемы свидетельствуют о том, что при импульсном регулировании скорости ДПВ электромагнитные процессы в якорной цепи и обмотке возбуждения при определенной частоте коммутации протекают аналогично двигателю постоянного тока с независимым возбуждением.

Перечень ссылок

1. Метельський В. П. Електричні машини та мікромашини. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 616 с.
2. Глазенко Т. А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 304 с., ил.
3. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2002. – 304 с., ил.
4. Герман-Галкин С. Г., Г. А. Кардонов Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2003. – 256 с., ил.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. – СПб.: Учитель и ученик, Корона-принт, 2001. – 319 с., ил.
6. Перльмутер В. М., Сидоренко В. А. Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с., ил.
7. Пегов Д. В., Бурцев П. В., Андреев В. Е. Руководство по устройству электропоездов ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М.– М.: Центр коммерческих разработок, 2003. – 184 с.,табл.,ил.

Поступила в редакцию 14.03.07 г.

После доработки 04.04.07

Розроблена вдосконалена схема імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження. Для запропонованої і існуючої схем імпульсного регулювання розроблені моделі, за допомогою яких досліджені електромеханічні процеси тягового електроприводу в цих схемах і виконано їх порівняльний аналіз.

The improved scheme of impulsive regulation of series excitation direct current motor was developed. The impulsive regulation models for offered and existent schemes were developed, the electro-mechanical processes of electric drive were probed and comparative analysis was presented.

УДК 621.313.2.001.57

Е. С Назарова , А. В Пирожок, Ю. А. Супрун

Имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки

Разработана имитационная модель механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки, предназначенная для исследования электромеханических процессов стана.

Улучшение качества прокатываемого металла и повышение производительности станов холодной прокатки требует глубокого исследования электромеханических процессов станов. Это, в свою очередь, вызывает практическую необходимость и актуальность создания имитационных моделей станов, воспроизводящих реальные электромеханические процессы в них. Имитационные модели позволяют без нарушения существующего производственного цикла прокатного стана исследовать его электромеханические процессы, заметно снизить трудоемкость и затраты на проведение этих исследований по сравнению с экспериментом.

Исследованию процесса механического движения металла в различных прокатных станах посвящено достаточно много работ, например, [1–4]. В книге [1] приведены математические описания законов, определяющих связь электромеханических параметров стана с параметрами технологических процессов. В работе [2] изложены основы теории прокатки и автоматизации непрерывного стана холодной прокатки, где этот стан и его автоматизированный многодвигательный электропривод рассматривается как единый электрифицированный агрегат. В статье [3] разработана и описана имитационная модель механического движения металла для непрерывного стана «Тандем». В монографии [4] рассмотрены общие принципы рабо-

ты различных реверсивных станов холодной прокатки. Анализ известных работ показывает, что большинство из них [1–3] посвящены исследованию процесса механического движения металла в непрерывных станах холодной прокатки, в которых указанное движение в значительной степени отличается от реверсивных станов (в частности, особенностями, связанными с реверсированием металла в последних). В известных немногочисленных работах [4], посвященных реверсивным станам холодной прокатки, остались без внимания вопросы: углубленного рассмотрения динамических процессов указанных станов, связанных с реверсированием проката; исследования электромеханических процессов указанных станов; создания имитационных моделей для исследования процесса механического движения металла в этих станах.

Целью работы является создание имитационной модели механического движения металла для реверсивного одноклетевого стана холодной прокатки, предназначенной для исследования электромеханических процессов.

Кинематическая схема данного стана показана на рис. 1. Процесс прокатки в одноклетевом стане осуществляется при натяжении полосы как со стороны входа в клеть, так и на выходе из стана. Причем, натяжение металла на выходе стана, возникающее между