

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СТАНОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

Д. А. Сычев, sychevda@susu.ru

В. А. Кушнарёв, a55538a@yandex.ru

М. А. Григорьев, grigorevma@susu.ru

В. Ф. Бухтояров, bvf@chelkom.ru

Н. М. Максимов, maximovnm@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Статья посвящена выбору параметров силового электрооборудования технологических объектов со сложной и нестандартной кинематикой рабочих органов. Выполнен анализ особенностей работы стана холодной прокатки труб и обоснована актуальность задачи синтеза системы электроприводов. Показаны преимущества синхронного реактивного электродвигателя независимого возбуждения с учетом особенностей технологических операций рассматриваемого оборудования. Решение задачи оптимизации геометрии электромагнитного преобразователя выполнялось по критерию развиваемого электромагнитного момента. Произведен расчет механических напряжений предлагаемой конструкции ротора двигателя для заданных скоростей и нагрузок. Исследовано влияние наличия «перемычки» в радиальном направлении на прочность вращающихся частей машины. Многокритериальная задача поиска оптимальных решений конфигурации схем силовых цепей выполнялась по критериям капитальных затрат и надежности. Обосновано применение шестифазного трехуровневого электрического преобразователя. В результате общее быстродействие электропривода вспомогательного механизма было увеличено практически в три раза, а общая производительность стана была улучшена на 10-15%. Синтез схем силовых цепей электрического преобразователя многоуровневого исполнения обеспечил снижение потерь на 1%.

Ключевые слова: стан холодной прокатки труб, многокритериальная оптимизация, вспомогательные механизмы, синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения, многоуровневый преобразователь частоты

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20145, <https://rscf.ru/project/22-29-20145/>.

Для цитирования: Выбор параметров силового электрооборудования станом холодной прокатки труб / Д. А. Сычев, В. А. Кушнарёв, М. А. Григорьев, В. Ф. Бухтояров, Н. М. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 4. С. 71–79. DOI: 10.14529/power230408

PARAMETERS IDENTIFICATION OF POWER ELECTRICAL EQUIPMENT FOR PIPE COLD ROLLING MILL

D. A. Sychev, sychevda@susu.ru

V. A. Kushnarev, a55538a@yandex.ru

M. A. Grigorev, grigorevma@susu.ru

V. F. Bukhtoyarov, bvf@chelkom.ru

N. M. Maksimov, maximovnm@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Parameters identification of power electrical equipment for technological objects with complex and non-standard kinematics of working bodies is considered. Operation features analysis for a cold-rolling pipe mill is carried out and the relevance of the design problem of electric drive system is substantiated. The advantages of a field regulated reluctance machine are substantiated considering the peculiarities of the technological operations and equipment. Motor electromagnetic torque parameter is used as criteria for geometry optimization problem. The mechanical stresses calculation of the rotor proposed design for given speeds and loads is performed. The influence of a "jumper" in the radial direction on the strength of the machine rotating parts is shown. The multi criteria optimization task for the configuration of power circuits is carried out according to capital costs and reliability. The effectiveness of a six-phase three-level electrical converter is substantiated. The operation speed of the electric drive of the auxiliary mechanism is increased by almost three times, and the performance of cold-rolling pipe mill is improved by 10-15%. Power circuits configuration for multilevel electric converter ensures a reduction of losses by 1%.

Keywords: cold-rolling pipe mill, multi-criteria optimization, auxiliary mechanisms, field regulated reluctance machine, multilevel frequency converter

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-20145, <https://rscf.ru/project/22-29-20145>.

For citation: Sychev D. A., Kushnarev V. A., Grigorev M. A., [et. al.] Parameters identification of power electrical equipment for pipe cold rolling mill *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(4):71–79. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230408

Введение.

Прокатные технологические установки применяются для изготовления бесшовных труб разного сортамента. Требования к качеству продукции могут существенно отличаться в зависимости от области применения, например, отрасли нефтяной и химической промышленности, гражданского строительства, топливно-энергетического комплекса и другие. Существует несколько последовательных этапов прокатки на станах пилигримовой группы. Самым ответственным признается процесс холодной прокатки, то есть изготовление высококачественных труб.

Холодной прокатке подвергаются трубы из нержавеющей и высоколегированных сталей, малопластичных металлов и сплавов, а также трубы ответственного назначения [1]. В этом случае удается получить геометрически точные размеры готовой продукции с внутренней и наружной поверхностью высокого качества. На производственных площадках Челябинского трубопрокатного завода применяют станы холодной прокатки различного типоразмера с возможностью изготовления бесшовных труб с наружным диаметром от 57 до 450 мм с толщиной стенки от 1,5 до 44 мм. В [2]

описан принцип работы станом периодического действия для производства высококачественных труб (рис. 1).

Существующая компоновка станом холодной прокатки предполагает наличие механической трансмиссии между главным электроприводом и вспомогательными механизмами. Следует отметить, что такое решение не обеспечивает надежной реализации последовательности «вспомогательные операции – прокатка». Это приводит к смещению во времени выполнения вспомогательных операций, в результате к значительным перегрузкам оборудования и снижению качества изготавливаемой продукции [3]. Снижение скорости прокатки при определенных обстоятельствах позволит повысить качество, однако это приведет к снижению производительности, что нежелательно, а в некоторых случаях недопустимо.

Описанные в работе [4] способы обеспечения необходимого качества продукции на станах пилигримовой группы с учетом производительности рассмотрены в основном с точки зрения существующего на производственных площадках оборудования. Изучение особенностей кинематики рассматриваемых технологических объектов, при-

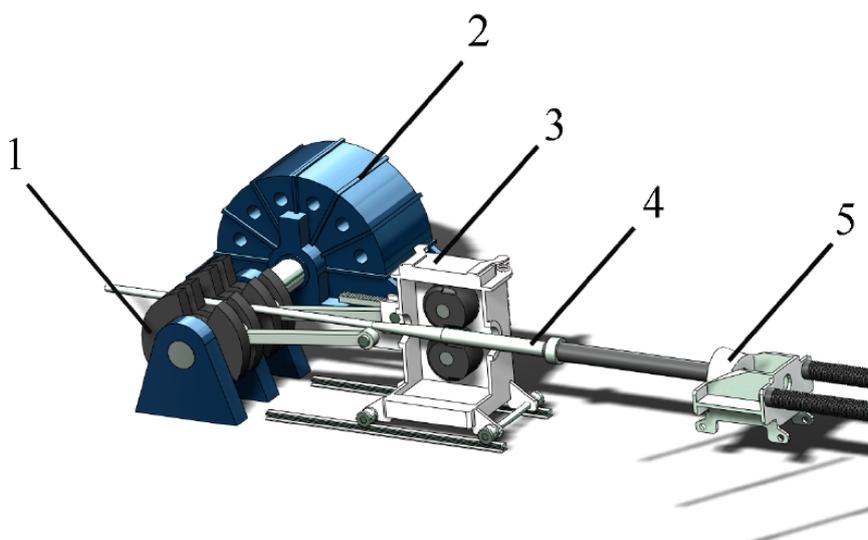


Рис. 1. Стан холодной прокатки труб: 1 – кривошипно-шатунный механизм; 2 – электродвигатель; 3 – прокатная клеть; 4 – трубная заготовка; 5 – вспомогательные механизмы подачи и поворота трубы
Fig. 1. Pipe cold rolling mill: 1 – crank mechanism; 2 – electric motor; 3 – rolling stand; 4 – pipe blank; 5 – auxiliary mechanisms for feeding and turning the pipe

нимая во внимание серьезные требования к готовой продукции (например, предельные отклонения по диаметру на станах холодной прокатки труб могут составлять доли миллиметра, а по толщине стенки трубы – 0,2-0,9 мм), заставляет с позиции поставленных задач обратить внимание на необходимость обеспечения не связанной механически, но согласованной в рамках цикла прокатки работы основного и вспомогательного оборудования, учитывая возможные перегрузки.

Научно-техническую задачу данной работы можно считать актуальной с учетом существенно-го роста спроса на бесшовные трубы, постоянно растущие требования к качеству прокатной продукции, принимая во внимание физический износ существующей компоновки оборудования, а также значительную долю потребления энергии станами данной группы.

В предшествующих практических результатах авторов данной статьи, посвященных станам холодной прокатки, задача синтеза была упрощена и сводилась к проектированию быстродействующей системы электропривода. Учитывая существенную податливость труб на станах холодной прокатки, для обеспечения требуемого качества продукции и производительности, принимая во внимание имеющиеся ограничения, необходима разработка системы электропривода с улучшенными массогабаритными показателями.

В данной работе электропривод механизма подачи предлагается реализовать на базе синхронного реактивного двигателя независимого возбуждения (СРДНВ), обладающего бесспорными преимуществами с точки зрения надежных, эксплуатационных и технико-экономических показателей: линейность моментной характеристики, обеспечиваемая за счет системы управления, что позволяет повысить линейную токовую нагрузку на 20%; высокий удельный развиваемый момент; отличающиеся своей простотой схемы управления; высокая энергоэффективность (электрические потери относительно традиционных двигателей меньше на 30-40%); относительно низкий момент инерции; простая и надежная конструкция ротора: нет магнитов, обмоток; имеется возможность достижения высокой перегрузочной способности (до 5 крат от номинального момента).

Поиск оптимальных массогабаритных показателей электродвигателя.

Синхронному реактивному электроприводу, предлагаемому в качестве основного решения в данной работе, свойственны следующие достоинства: исполнение ротора без обмоток, простая конструкция, высокая энергоэффективность (отсутствуют электрические потери в роторе), возможность работы в режимах с высокими перегрузками по моменту. Описанные преимущества наряду с

особенностями технологического процесса признаются существенными при проектировании системы [5].

Представляется возможным разработка электрической машины с относительно меньшим моментом инерции вращающейся части за счет исполнения с высоким коэффициентом отношения длины к диаметру. Это обеспечивается благодаря безобмоточной конструкции и продольной жесткости ротора. Синхронный реактивный двигатель независимого возбуждения может быть выполнен в габаритах типового исполнения асинхронной машины. При этом следует отметить несколько обстоятельств: процесс протекания магнитного потока, геометрия и параметры магнитонепроводящих вставок ротора, механические напряжения во вращающейся части двигателя. Поэтому критерием поиска оптимальных решений геометрии машины принят развиваемый электромагнитный момент.

Расчет механических напряжений вращающейся части машины выполнялся для различных значений отношения внутреннего диаметра статора к внешнему и размера спинки ротора. Для решения этой задачи проводился статический анализ механических свойств электромеханического преобразователя под действием центробежных сил (угловая скорость $\omega = 100$ рад/с) и под действием крутящего статического момента ($3,5 \cdot M_n = 33,7$ кН·м). Один из вариантов картин распределения механических напряжений под действием центробежных сил и крутящего момента приведен на рис. 2.

В данном случае механические напряжения под действием центробежных сил (см. рис. 2-1) существенно превышают заданный предел текучести ($\sigma_T = 225$ МПа). Максимальные величины напряжений возникают в спинке ротора, между магнитонепроводящими вставками и внешним диаметром ротора. Принято решение учитывать размер спинки ротора при решении задачи оптимизации.

Распределение напряжений под действием крутящего момента показано на рис. 2-2. В ходе исследования было выявлено, что при конструкции вращающейся части с выбранными параметрами механическая прочность недостаточна. Принято решение ограничить минимальный размер спинки ротора для данного электромеханического преобразователя (не менее 8 см) и дополнительно разместить перемычку в радиальном направлении.

В этом случае статический анализ показал удовлетворительные результаты, то есть ротор обладает достаточной механической прочностью, а механические напряжения под действием центробежных сил не будут превышать предел текучести материала и максимальное значение упругих деформаций.

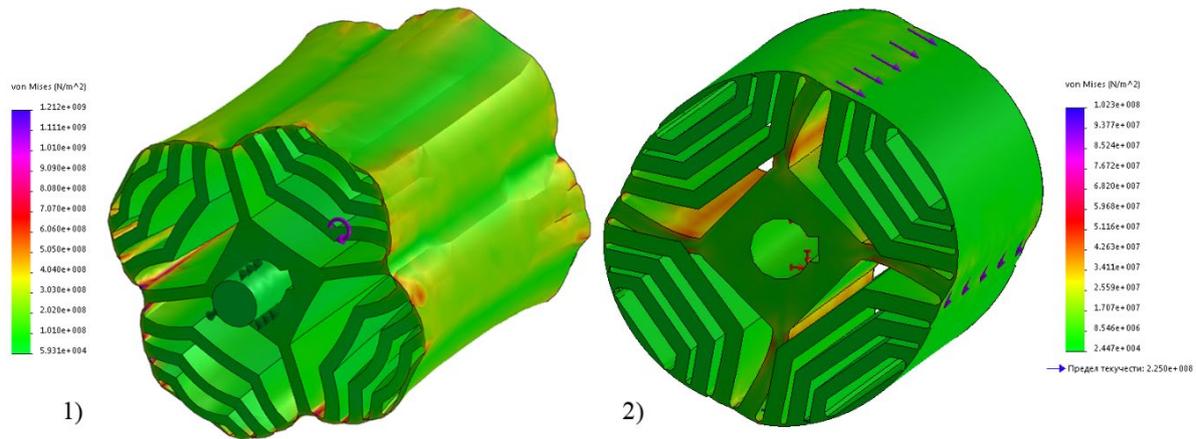


Рис. 2. Картина распределения механических напряжений под действием центробежных сил (1) и крутящего момента (2)
Fig. 2. Mechanical stress distribution under the influence of centrifugal forces (1) and torque (2)

Поиск оптимальных массогабаритных показателей синхронной реактивной машины независимого возбуждения выполнялся численными методами. При этом также использовался метод конечных элементов с целью достоверно учесть конструктивное исполнение магнитной системы. На рис. 3 приведена зависимость развиваемого электромагнитного момента M от отношения внутреннего диаметра статора D_{in} к внешнему D_{out} для различных величин спинки ротора S_{rot} .

Расчет начинался с соотношения $D_{in}/D_{out} = 0,7$, рекомендуемой величины при проектировании двухполюсных асинхронных электродвигателей. В результате было выявлено, что оптимальное решение с точки зрения геометрии машины наблюдается при $D_{in}/D_{out} = 0,6$ при минимальном значении размера спинки ротора (см. рис. 3). Далее показатель D_{in}/D_{out} снижать нецелесообразно, так как это не дает значительного прироста электромагнитного момента двигателя. При этом учитывались результаты статического анализа механических напряжений: ограничение по минимально допустимой величине спинки ротора (расстояние от внешнего диаметра ротора до магнито-непроводящей вставки – не менее 8 см). На рис. 3 данные участки показаны серым цветом.

Величины электромагнитного момента, полученные при относительно меньших значениях D_{in}/D_{out} , объясняются просто. В асинхронной машине распределение магнитного потока равномерное по всей длине окружности статора, в синхронном реактивном двигателе линии потока сосредоточены вдоль магнитопроводящих частей ротора,

что приводит к более существенному насыщению спинки статора.

В результате было разработано техническое задание на проектирование синхронной реактивной машины независимого возбуждения: $M = 9,6$ кНм; угол нагрузки $\theta = 13^\circ$, $I = 1085$ А; $n = 990,5$ об/мин; $U = 660$ В.

Режимам работы электроприводов подающей-поворотной группы станов холодной прокатки труб характерны участки перегрузок по причине несвоевременной работы главного привода и вспомогательных механизмов. Динамические и суммарные нагрузки, приведенные к валу двигателя, приведены в таблице 1.

Табл. 1.
Динамические и суммарные нагрузки стана
холодной прокатки труб

Table 1.
Dynamic and total loads of a cold pipe rolling mill

Механизм	Поворот трубы	Поворот оправки	Подача трубы
$M_{длин}$, Нм	7 821	7 457	8 598
$M_{макс}$, Нм	8 821	8 457	9 598

Станам рассматриваемой группы характерны перегрузки по моменту, кратные 3,5 от номинального. Типовое исполнение асинхронных электроприводов предполагает максимально допустимый момент, не превышающий 3,5 крат. Следует отметить, что в данной точке значительно увеличивается величина тока статора, при этом электродвигатель может перейти в неустойчивый режим работы.

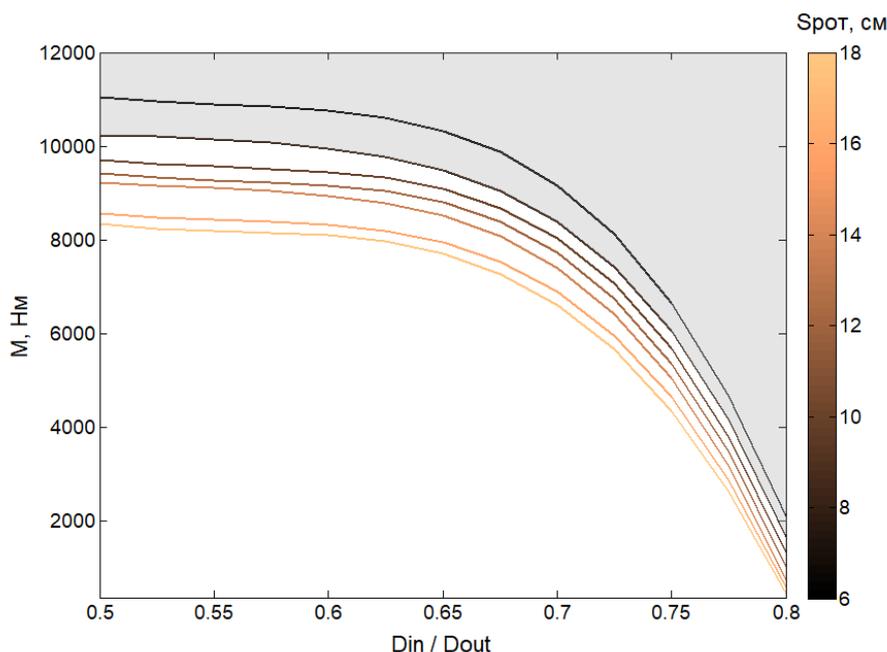


Рис. 3. Результаты оптимизации массогабаритных показателей машины
Fig. 3. Results of optimization of the machine's weight and dimensions

В случае синхронных реактивных электроприводов независимого возбуждения за счет системы управления (обеспечивается одновременное управление по каналам возбуждения и якоря в функции момента) получается линейная моментная характеристика на участках перегрузки (до 5 крат номинального момента). Использование многофазного полупроводникового преобразователя позволит управлять каждой фазой обмотки статора независимо, однако разработка схемы силовых цепей будет иметь свои особенности.

Проектирование схемы силовых цепей.

Ранее считалось, что схемы силовых цепей многоуровневого исполнения рационально применять для электротехнических комплексов с высоким напряжением (более 1 кВ). Однако с учетом развития полупроводниковой техники на сегодняшний день возможно рассмотреть и обосновать внедрение многоуровневых схем питания для низковольтного оборудования (до 1 кВ). Описанные решения обладают рядом достоинств. В первую очередь, это снижение предъявляемых квалификационных требований к обслуживающему персоналу за счет упрощения собственно эксплуатации электротехнического оборудования. Во-вторых, возможность увеличить несущую частоту благодаря пониженному напряжению, что дает более качественную форму фазного тока. В-третьих, снижение потерь в электрическом преобразователе за счет применения амплитудной и частотной модуляций, что признается нами актуальным для тех-

нологических агрегатов большой установленной мощности.

Многокритериальная задача поиска оптимальных решений для исполнения схем силовых цепей была начата с анализа стоимости на полупроводниковые преобразователи. Для этого проводился статистический анализ имеющихся в свободном доступе данных известных и зарекомендовавших себя производителей. Полученные в итоге регрессионные зависимости удельной стоимости электрических преобразователей от тока показали, что с ростом мощности цена одного Ампера снижается. Это объясняется относительно существенными затратами на микропроцессорную систему управления при малой мощности преобразователя. В диапазоне больших мощностей доля относительной стоимости цифровых сигнальных процессоров и программного обеспечения существенно ниже по сравнению с силовыми полупроводниковыми ключами. Учет совместной работы полупроводникового преобразователя и двигателя позволит достичь наилучших массогабаритных показателей системы электропривода. В данном случае целесообразно в качестве критерия оптимизации выбрать:

$$k_3 = \frac{Z(y)}{T} = \frac{Z(N_B^0, N_A^0, N^0, \frac{R_r^0}{R_d}, \alpha^0, f)}{T}, \quad (1)$$

где T – момент двигателя при номинальном токе; $Z(y)$ – обобщенная величина, учитывающая массогабаритные показатели системы «Преобразователь – электрическая машина» в зависимости от y .

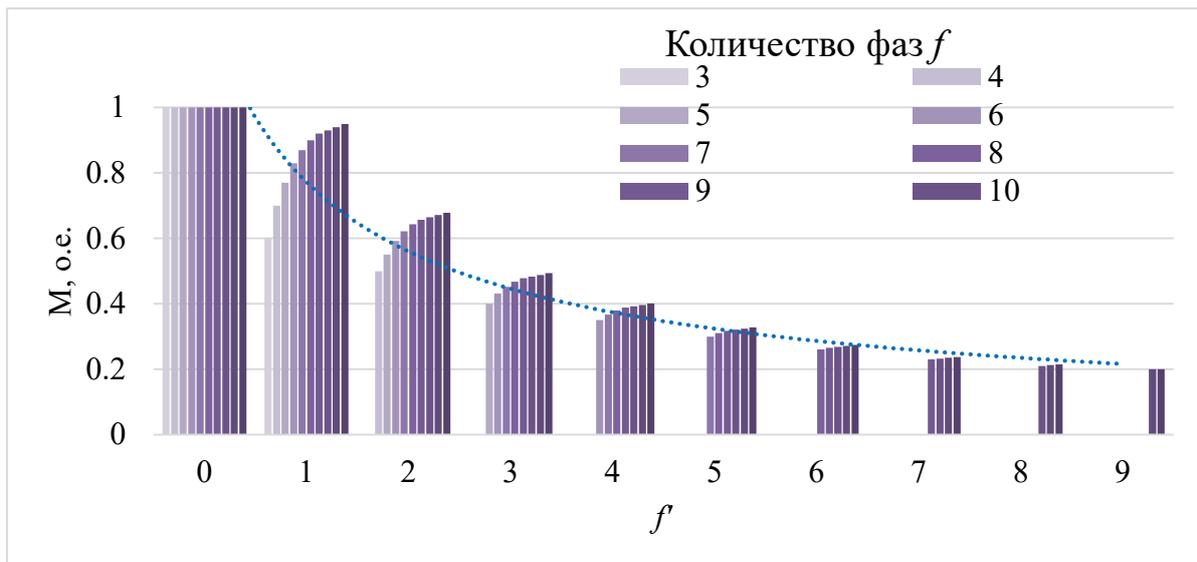


Рис. 4. Зависимость допустимого момента от общего количества фаз схемы силовых цепей f и от количества отказавших фаз f'

Fig. 4. Dependence of the permissible torque on the total number of phases of the power circuit circuit f and on the number of failed phases f'

При этом переменные нагрузки по возбуждению, якорю и результирующему потоку (N_B^0, N_A^0, N^0) – выбирались по рекомендациям [6], а параметры двигателя $\frac{R_r^0}{R_a}$ – отношения внутреннего диаметра R_r к внешнему R_a , α^0 – полюсное деление выбирались по рекомендациям [7] – и сохранялись постоянными, а в качестве параметра оптимизации выбиралось значение фаз преобразователя частоты и электрической машины f . Следует отметить, что на f накладывались ограничения $F = \{f: 0 \leq f \leq \infty\}$.

Следующий этап выполнялся с учетом предположения, что ток в многофазной системе обратно пропорционален количеству фаз. Использование результатов регрессионного анализа позволило зависимость удельной стоимости электротехнического комплекса представить в виде полинома пятого порядка:

$$Z(y) = X_1 \cdot I_n^5 + X_2 \cdot I_n^4 + X_3 \cdot I_n^3 + X_4 \cdot I_n^2 + X_5 \cdot I_n + X_6. \quad (2)$$

Величины коэффициентов X_1, X_2, \dots, X_6 , зависящие от удельной стоимости полупроводниковых электрических преобразователей, рассчитаны с учетом результатов выполненного статистического анализа, а затем уточнялись для многоуровневых схем, I_n – параметр, пропорциональный номинальному току и изменяющийся в функции количества фаз схемы силовых цепей.

Для принятого порядка полиномиального уравнения использовался метод одномерного поиска экстремума функции. Анализ результатов показал, что наименьшие затраты на электриче-

ский преобразователь (для технологических объектов малой мощности) получаются в случае трехфазного исполнения силовой схемы. В случае значительной установленной мощности электротехнического комплекса экстремум функции (минимум) достигается при большем количестве фаз. Например, при номинальной мощности $P_n = 1000$ кВт и моменте $T_n = 10$ кНм, минимум стоимости может быть получен при числе фаз равном шести. Данное обстоятельство обосновывается особенностями построения схем силовых цепей с использованием транзисторов большей установленной мощности. В случае трехфазного исполнения необходимо предусматривать параллельное включение транзисторных ключей, а также учитывать несимметричную нагрузку на модули. Увеличение количества фаз позволит обойтись без параллельного включения транзисторов, а, следовательно, снизить капитальные затраты на силовую преобразовательную технику.

При проектировании схем силовых цепей целесообразно учитывать показатели надежности системы. Одним из широко распространенных способов обеспечения надежности признается завышение установленной мощности комплекса (электрического и электромеханического преобразователей). Однако при этом значительно повышается габарит и капитальные затраты. Еще один способ – увеличение количества фаз и выполнение гальванической развязки между фазными обмотками двигателя. Этот метод вполне оправдан при проектировании специальных электрических машин металлургических агрегатов. Такое решение позволяет избежать полной остановки системы электропривода при отказе одной или нескольких

фаз (в зависимости от их общего количества), так как объект остается работоспособным при незначительном снижении максимально допустимой нагрузки.

и при этом каждый элемент полупроводникового устройства (инверторный блок, выпрямитель, модуль фильтров) включает в себя несколько узлов, подключенных параллельно, то целесообразно

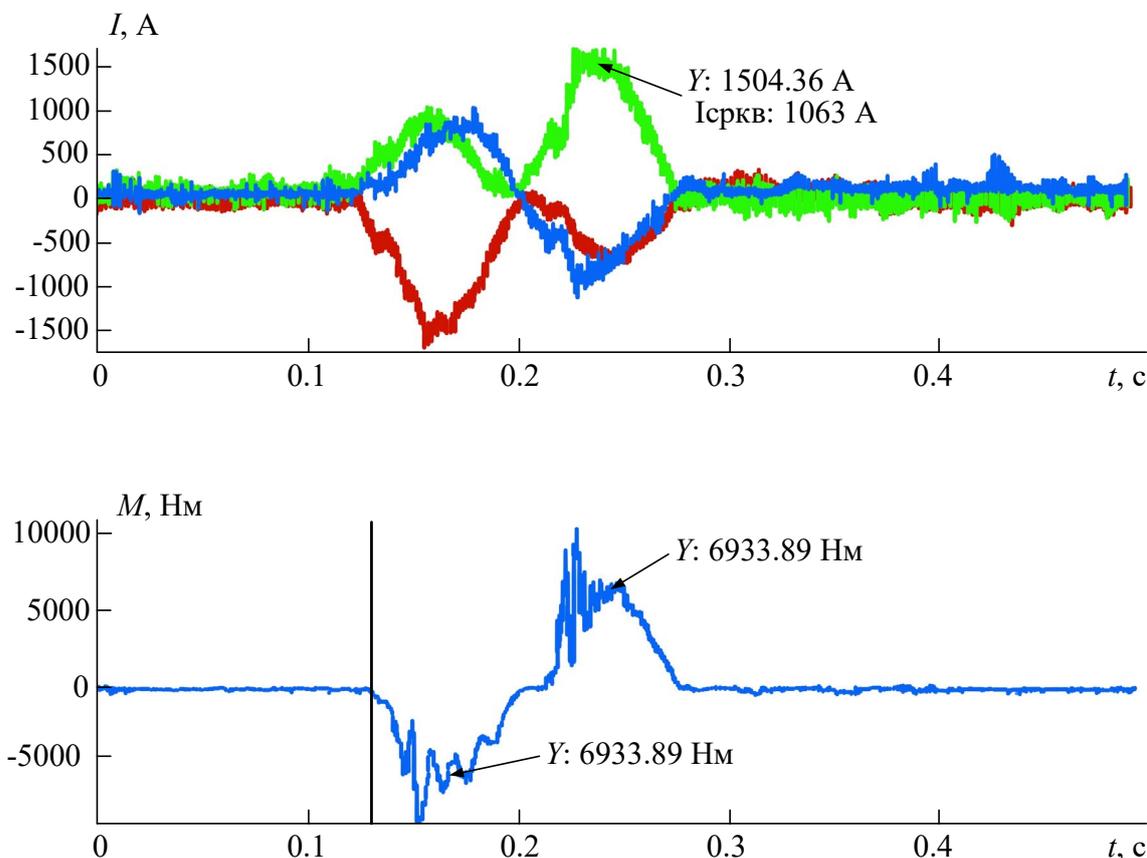


Рис. 5. Осциллограммы переходных процессов электропривода
Fig. 5. Oscillograms of transient processes of the electric drive

На рис. 4 представлена зависимость допустимого момента от числа отказавших фаз f' для случаев разного количества фаз схемы силовых цепей f . Анализ полученных результатов показал, что при общем количестве фаз больше шести ($f > 6$) при отказе одной из них наблюдается незначительное снижение допустимого момента. Для схемы силовых цепей с шестью фазами это снижение не превышает 10%, а для 12 фаз – 5%. Представленная зависимость позволяет дать количественную оценку надежности многофазной схемы. Если применять схемы с шестью фазами, то вероятность безотказной работы будет составлять 0,92, а в случае двенадцати фаз показатель достигает 0,95.

Новые подходы к выбору конфигурации схем силовых цепей требуют пересмотра принципов определения оптимального количества фаз и структуры полупроводникового преобразователя. Так как современные преобразователи частоты на большие мощности выполняются в виде модулей,

пересмотреть традиционное количество фаз в пользу увеличения. Это приводит не только к снижению установленной мощности, но и к улучшению показателей надежности системы. При переходе от двухуровневых схем силовых цепей к многоуровневым конфигурациям для напряжения уровня до 1 кВ представляется возможным реализовать более сложные алгоритмы формирования выходного напряжения, как в режиме широтно-импульсной, так и амплитудной модуляции. Как показали исследования в [8] электрические потери в системе снижаются примерно на 1,5%.

За счет развития современной элементной базы экономически обосновано применение трехуровневых преобразователей частоты для уровня напряжения до 1 кВ. При этом установлено, что кроме существующих преимуществ такой схемы (снижений коммутационных потерь и перенапряжения на фазной обмотке) удастся дополнительно повысить КПД преобразователя частоты за счет

**Сычев Д.А., Кушнарёв В.А., Григорьев М.А.
Бухтояров В.Ф., Максимов Н.М.**

большого числа степеней свободы при переходе к многофазным схемам.

Обсуждение и результаты.

Результаты данной работы использовались при проектировании электротехнического комплекса механизмов подачи и поворота для Челябинского трубопрокатного завода. При этом схемы силовых цепей полупроводниковых преобразователей, реализованные по шестифазной схеме трехуровневого исполнения, были экспериментально апробированы в ООО НТЦ «Приводная техника» на базе серии МОМЕНТУМ. Результаты по улучшению массогабаритных показателей многофазных синхронных реактивных машин представлены в качестве практических рекомендаций для Снежинского завода специальных электрических машин (г. Снежинск).

На рис. 5 приведены осциллограммы процессов, которые регистрировались цифровым прибором Fluke 192 В. Постоянная времени переходного процесса в контуре регулирования момента не превышала тысячных долей секунды, а полоса равномерного пропускания частот была не менее $\omega_c=1000$ рад/с. Сопоставляя осциллограммы тока и момента, можно показать, что зависимость между электромагнитным моментом и током носила линейный характер даже в зоне существенных пере-

Выбор параметров силового электрооборудования станое холодной прокатки труб

грузок. Таким образом, общее быстродействие электропривода механизма поворота было увеличено примерно в 2,5-3 раза, а общая производительность стана была улучшена примерно на 10-15%. В рамках экспериментального исследования на базе ООО НТЦ «Приводная техника» были выполнены измерения энергетических показателей системы путем регистрации графика потребляемой мощности. Результаты показали снижение потерь в электрическом преобразователе примерно на 1%. Такое повышение КПД обусловлено в первую очередь применением трехуровневого преобразователя.

Заключение.

В результате была разработана отвечающая требованиям технического задания методика выбора силового электротехнического оборудования, обеспечивающая высокую эффективность и необходимое качество производимой продукции станое холодной прокатки. Выполненная на базе ООО НТЦ «Приводная техника» экспериментальная часть работы позволила в полной мере оценить и показать большее быстродействие системы электропривода вспомогательного механизма по сравнению с существующим решением, снижение электрических потерь приблизительно на 1%, улучшение общей производительности стана на 10-15%.

Список литературы

1. Savchenkov S.A., Bazhin V.Yu., Volkova O. Tendencies of innovation development of the russian iron and steel industry on the base of patent analytics for the largest national metallurgical companies. CIS Iron and Steel Review, 2020, vol. 20.
2. Li, Y. Development of cycle type cold rolling mill. Steel Pipe, 2002, 31 (4).
3. Efron, L.I., Il'Inskii, V.N., Morozov, Y.D., Golovanov, A.V. Development and industrial testing of high-strength and cold-resistant pipe steel with bainitic structure. Stal 2003, №9.
4. Danchenko, V.N., Frolov, Y.V., Dekhtyarev, V.S., Golovchenko, A.P., Belikov, Y.M., Tereshchenko, A.A., Chigirinskiy, Y.V. Development of pipe cold pilger rolling mode computation method with account of metal properties change. Metallurgical and Mining Industry 2011, 3 (3).
5. Григорьев М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения и с другими типами двигателей. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика», Электромеханика, 2009, 34.
6. Lipo, T.A. Analysis of synchronous machines: Second Edition Analysis of Synchronous Machines: Second Edition, 2017, pp. 1-590.
7. Boazzo B., Vagati A., Pellegrino G., Armando E., Guglielmi P. Multipolar ferrite-assisted synchronous reluctance machines: A general design approach. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2), pp. 832-845.
8. Rodríguez, J., Bernet, S., Wu, B., Pontt, J.O., Kouro, S. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007, 54, pp. 2930–2945.

References

1. Savchenkov S.A., Bazhin V.Yu., Volkova O. Tendencies of innovation development of the russian iron and steel industry on the base of patent analytics for the largest national metallurgical companies. CIS Iron and Steel Review, 2020, vol. 20.
2. Li, Y. Development of cycle type cold rolling mill. Steel Pipe, 2002, 31 (4).
3. Efron, L.I., Il'Inskii, V.N., Morozov, Y.D., Golovanov, A.V. Development and industrial testing of high-strength and cold-resistant pipe steel with bainitic structure. Stal 2003, №9.
4. Danchenko, V.N., Frolov, Y.V., Dekhtyarev, V.S., Golovchenko, A.P., Belikov, Y.M., Tereshchenko, A.A., Chigirinskiy, Y.V. Development of pipe cold pilger rolling mode computation method with account of metal properties change. Metallurgical and Mining Industry 2011, 3 (3).

5. Grigoriev M.A. Limiting capabilities of electric drives with independent excitation synchronous reluctance machine and other types of motors. Bulletin of the South Ural State University. Series "Energy", Electromechanics, 2009, 34.

6. Lipo, T.A. Analysis of synchronous machines: Second Edition Analysis of Synchronous Machines: Second Edition, 2017, pp. 1-590.

7. Boazzo B., Vagati A., Pellegrino G., Armando E., Guglielmi P. Multipolar ferrite-assisted synchronous reluctance machines: A general design approach. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2), pp. 832-845.

8. Rodríguez, J., Bernet, S., Wu, B., Pontt, J.O., Kouro, S. Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007, 54, pp. 2930–2945.

Информация об авторах

Сычев Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент., кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sychevda@susu.ru

Кушнарв Виктор Александрович, студент, кафедра техники, технологий и строительства, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; a55538a@yandex.ru.

Григорьев Максим Анатольевич, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; grigorevma@susu.ru

Бухтояров Василий Федорович, д-р техн. наук, проф., Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; bvf@chelkom.ru

Максимов Никита Максимович, аспирант, кафедра электропривода, мехатроники и электромеханики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; maksimovnm@susu.ru

Information about the authors

Dmitriy A. Sychev, Cand. Tech. Sci. (Eng.). Associate Prof., Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sychevda@susu.ru

Victor A. Kushnarev, Bachelor Student, Department of Engineering, technology and construction, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; a55538a@yandex.ru

Maxim A. Grigoriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Electric Drive, Mechatronics and Electromechanics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; grigorevma@susu.ru.

Vasily F. Bukhtoyarov, Dr. of Tech. Sc., Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bvf@chelkom.ru

Nikita M. Maksimov, Postgraduate Student, Department of Electric Drive and Mechatronics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; maksimovnm@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 15.08.2023; одобрена после рецензирования 21.10.2023; принята к публикации 21.10.2023.

The article was submitted 15.08.2023; approved after review 21.10.2023; accepted for publication 21.10.2023.