

УДК 621.313-57

Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей

М.В. Вечеркин, М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
г. Магнитогорск, Российская Федерация
E-mail: max_vecherkin@mail.ru, anvar@magtu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время стоимость пусковых устройств для мягкого пуска высоковольтных асинхронных двигателей продолжает оставаться высокой. Необходима разработка и исследование относительно недорогих пусковых устройств кратковременного действия.

Материалы и методы: При моделировании использовались программные средства решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений, а также расширение Simulink пакета Matlab. Экспериментальные результаты получены с применением современных цифровых аппаратно-программных средств.

Результаты: Предложены вариант трансформаторно-тиристорного пускового устройства, результаты теоретического и экспериментального исследований его возможностей по ограничению ударных механических нагрузок.

Выводы: Обоснована целесообразность создания объектно-ориентированных высоковольтных пусковых устройств кратковременного действия на базе трансформаторно-тиристорной структуры.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, мягкий пуск, пусковое устройство, ограничение ударного момента, тиристорный преобразователь напряжения, трансформатор.

Capability of Transformer and Thyristor Structure as Starting Device of High-Voltage Asynchronous Motors

M.V. Vecherkin, M.Yu. Petushkov, A.S. Sarvarov
Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation
E-mail: max_vecherkin@mail.ru, anvar@magtu.ru

Abstract

Background: At present the cost of starting devices for soft start of high-voltage asynchronous motors remains high. As a result, the research and development of relatively inexpensive starting devices of short-term action are necessary.

Materials and methods: In the simulation the authors used the software for solving algebraic and differential equations systems, as well as the Simulink expansion of the Matlab package. The experimental results are obtained with the usage of modern digital hardware and software.

Results: The authors suggest the version of the transformer and thyristor starting devices, the results of theoretical and experimental studies of its ability to limit the impact of mechanical stress.

Conclusions: The expediency of designing the object-oriented high-voltage starting devices of short-time action on the basis of the transformer-thyristor structure is proved.

Key words: asynchronous motor, soft start, starting device, percussive moment limitation, thyristor voltage regulator, transformer.

В настоящее время на металлургических комбинатах России находятся в эксплуатации десятки тысяч высоковольтных электроприводов переменного тока. В частности, в ОАО «ММК» (Магнитогорский металлургический комбинат) свыше 2 тыс. высоковольтных электродвигателей в диапазоне мощностей от 0,5 до 20 МВт имеют применение в мощных установках, таких как компрессоры и турбокомпрессоры, насосы системы водоснабжения, насосы высокого давления, питательные насосы, тягодутьевые вентиляторы, эксгаустеры и др.

Большинство электроприводов данного типа изначально были спроектированы как нерегулируемые. Прямой пуск для них возможен по условиям мощности питающей сети и при этом

отсутствует необходимость в ограничении пускового тока. В то же время при прямом пуске в двигателе возникают ударные пусковые моменты, превышающие более чем в 10 раз номинальные значения. В настоящее время эксплуатационный ресурс многих электродвигателей находится на пределе. Для его продления необходима реализация условий мягкого пуска электродвигателей за счет снижения кратности амплитуд ударного пускового момента.

Серийные устройства пуска высоковольтного исполнения не нашли широкого применения по причине их высокой стоимости. В то же время в качестве положительно-го примера следует отметить эксплуатацию

системы поочередного запуска синхронных двигателей воздушных компрессоров мощностью 20 МВт, реализованной на ОАО «ММК» более 20 лет назад (рис. 1).

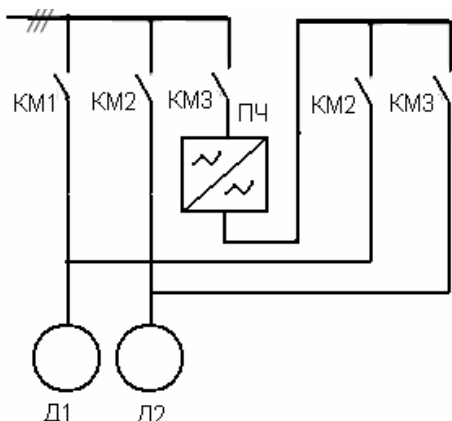


Рис. 1. Схема поочередного пуска компрессоров мощностью $P = 20$ МВт

В этой системе успешно используется высоковольтный тиристорный преобразователь частоты (ПЧ) мощностью 5 МВт.

Анализируя современные предложения производителей пуско-регулирующих устройств для высоковольтных электроприводов переменного тока, можно выделить два направления их реализации, а именно: бестрансформаторное и с применением промежуточного трансформатора. Каждое из этих направлений имеет свои недостатки и преимущества.

Трансформаторные варианты являются предпочтительными с позиции надежности работы полупроводниковой части преобразовательного устройства. Общеизвестно, что низковольтные устройства являются более предпочтительными по многим показателям, включая высокую надежность и низкую стоимость. На рис. 2 приведены трансформаторные варианты их реализации, когда в качестве управляющего звена используется надежный преобразователь низковольтного исполнения (ТПН или ПЧ), но при этом в данной системе применяют 2 трансформатора: понижающий и повышающий.

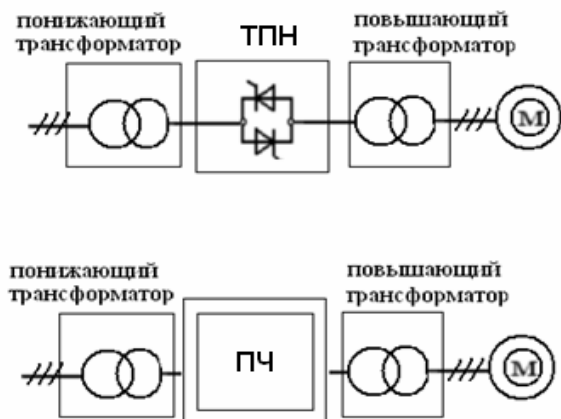


Рис. 2. Двухтрансформаторные варианты пусковых устройств для высоковольтных электроприводов

Современные высоковольтные пусковые устройства имеют срок окупаемости, заметно превышающий нормативное значение. По этой причине возникла необходимость развития концепции создания пусковых устройств нового типа, в основе которых лежит объектная ориентированность, простота реализации и низкая стоимость.

Действительно, если отсутствуют ограничения по мощности со стороны питающей сети и специальные требования по формированию пускового момента, то целесообразно использовать простейшие объектно-ориентированные устройства пуска кратковременного действия. Концепция создания таких устройств обусловлена тем, что достаточно управлять пусковым процессом кратковременно – на временном интервале длительностью не более одной секунды. Исследования многих авторов, проводимые в области данных проблем, обобщены в [1], где отмечается, что у маломощных асинхронных двигателей (АД) для ограничения ударных моментов на начальном этапе пуска до уровня критического момента достаточно обеспечить незначительное время регулирования 0,02–0,06 с. Таким образом, целесообразным является постановка задачи по созданию *пусковых устройств кратковременного действия* (ПУКД).

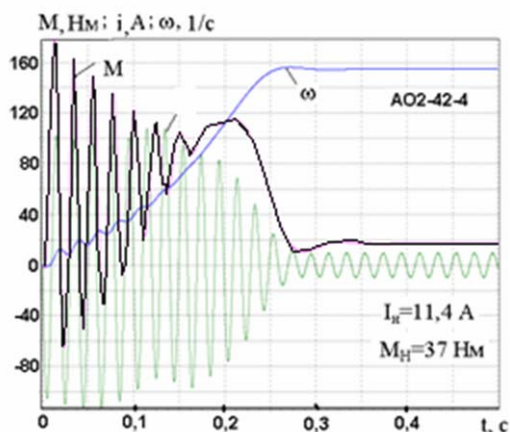
Для подтверждения этой идеи были специально рассмотрены качественные картины пусковых процессов, полученные на основе моделирования. На рис. 3 приведены расчетные осциллограммы пусковых процессов, которые показывают качественную картину пускового процесса АД и являются подтверждением необходимости реализации идеи создания ПУКД.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности развития концепции создания ПУКД и уточнения области применения таких устройств.

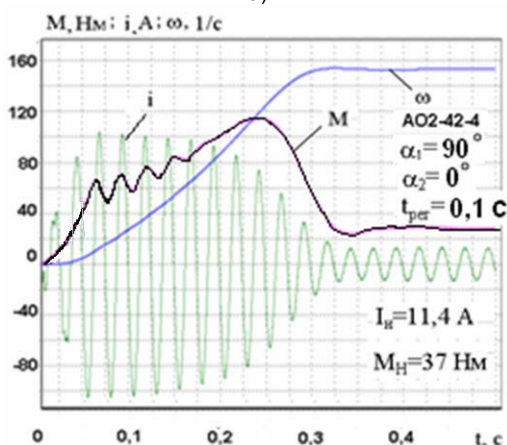
В металлургической промышленности для большинства высоковольтных электроприводов традиционными продолжают оставаться прямой и реакторный пуски. Реакторный пуск, являясь затяжным во времени, позволяет ограничить токовую нагрузку на питающую сеть, но при этом потери в двигателе могут заметно превысить потери при прямом пуске.

В отличие от представленных на рис. 2 схем с применением трансформаторов, предложен вариант использования трансформатора как преобразователя напряжения с регулируемым сопротивлением. При этом целесообразно рассмотреть трансформатор не как преобразователь напряжения, а как реактор, сопротивление которого зависит от его режима работы. В классической теории электротехники для большинства промыш-

ленных трансформаторов значение тока холостого хода не превышает значения 5 % от номинального тока, а напряжение короткого замыкания составляет не более 8 % от номинального напряжения.



а)



б)

Рис. 3. Расчетные осциллограммы пускового процесса АД при различных условиях: а – прямой пуск АД; б – пуск АД с линейным изменением угла управления тиристорами $\alpha = (90-900t)^\circ$

При этом изменение сопротивления трансформатора при переходе из режима холостого хода в состояние короткого замыкания определится соотношением

$$Z_{xx} / Z_{кз} = (20 Z_H) / (0,08 Z_H) = 250. \quad (1)$$

Таким образом, входное сопротивление трансформатора при управлении со стороны вторичной обмотки может использоваться как сопротивление управляемого реактора с возможностью изменения сопротивления в широких пределах.

Наиболее перспективным является вариант реализации трансформаторно-тиристорного пускового устройства [2], силовая схема которого приведена на рис. 4.

В этой схеме за счет потенциального разделения фаз вторичной обмотки трансформатора достигается заметное улучшение возможности независимого управления по фазам двигателя.

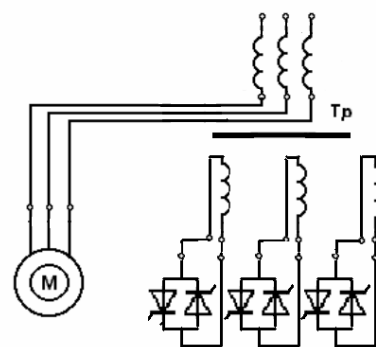


Рис. 4. Вариант реализации высоковольтного трансформаторно-тиристорного пускового устройства

Исследования проводились на модели, в которой реализован пуск высоковольтного двигателя ДАЗО-450У-4У1 мощностью 800 кВт и напряжением 6,0 кВ с применением силового масляного трансформатора ТМЗ ($S_n = 630$ кВА, $U_1 = 3000$ В). Моделирование проводилось с использованием пакета Simulink и его расширения SimPowerSystems. На рис. 5 показаны фрагменты начальной стадии пускового процесса длительностью 1 с (при общей длительности 7 с), позволяющие акцентировать внимание на том факте, что при реализации пускового процесса необходимо, в первую очередь, обеспечить определенные начальные условия пуска АД. Предустановка начального угла управления 90° и выше с последующим его изменением на интервале длительностью 1 с до значения угла 0° позволяет полностью устранить колебательный характер пускового момента.

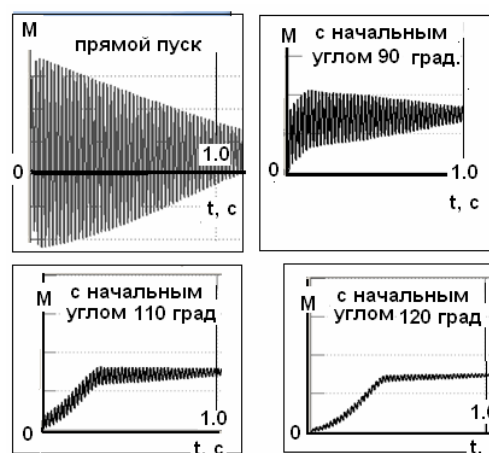


Рис. 5. Фрагменты результатов моделирования пускового процесса АД с трансформаторным устройством при различных начальных условиях

В качестве прототипа простейшего магнитопровода пускового трансформатора выбрана конструкция трехфазного индукционного реостата. Многие специалисты электротехнического направления имеют представление об индукционных реостатах, предложенных для применения в качестве базового пусково-

го устройства для двигателей с фазным ротором в крановых электроприводах. В этой связи в рамках проводимых работ по созданию объектно-ориентированных трансформаторов высоковольтных пусковых устройств кратковременного применения был применен цилиндрический сердечник типа «труба». Предварительные расчеты проводились с использованием функций Бесселя.

На рис. 6 приведены результаты испытаний системы ТТПУ-АД с начальным углом управления 90° . Переходные процессы управляемого тиристорно-трансформаторного пуска фиксировались с помощью анализатора качества энергии НЮКИ 3197. Характер изменения пускового момента определялся на базе оцифрованных сигналов мгновенных значений токов и напряжений во всех фазах двигателя. Такую функцию анализатор качества электроэнергии НЮКИ 3197 выполняет с частотой 12,8 кГц. В дальнейшем на его основе были проведены расчеты производных потокосцепления по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} &= u_A - i_A R; \\ \frac{d\psi_B}{dt} &= u_B - i_B R; \\ \frac{d\psi_C}{dt} &= u_C - i_C R. \end{aligned} \quad (2)$$

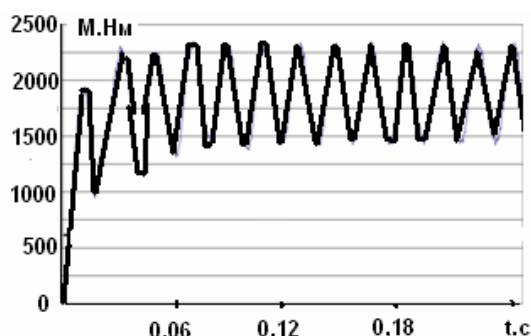


Рис. 6. Расчетный электромагнитный момент пускового режима на начальном этапе пуска

Вечеркин Максим Викторович,
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент кафедры физики,
телефон (3519) 23-57-50,
e-mail: max_vecherkin@mail.ru

Петушков Михаил Юрьевич,
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микроэлектроники,
телефон (3519) 23-57-50,
e-mail: petushkov_m@mail.ru

Сарваров Анвар Сабулханович,
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,
доктор технических наук, профессор, директор института энергетики и автоматики,
телефон (3519) 23-57-50,
e-mail: anvar@magtu.ru

Расчет электромагнитного момента проводился по формуле, известной в теории электромеханического преобразования энергии:

$$m_{\text{элмаг}}(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} [(\psi_C - \psi_B)i_A + (\psi_A - \psi_C)i_B + (\psi_B - \psi_A)i_C]. \quad (3)$$

Колебательность начального пускового момента при угле управления 90° имеет кратность по отношению к номинальному моменту двигателя, равную 2,5. Анализ расчетных осциллограмм (рис. 5) показывает, что общая картина изменения пускового момента совпадает как в качественном представлении, так и в количественном сопоставлении. При этом кратность максимального пускового момента не превышает значения 2,8.

В заключение целесообразно отметить, что с позиции технико-экономической целесообразности необходимость развития данного направления должна привлечь внимание эксплуатационного персонала и производителей пусковых устройств для высоковольтных электроприводов переменного тока.

Список литературы

1. **Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н.** Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 256 с.
2. **Свидетельство РФ** на полезную модель № 82963. Пусковое устройство трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока / Анисимов Д.М., Сарваров И.А., Петушков М.Ю., Сарваров А.С.; Оpubл. в БИПМ. 2009. №3.

References

1. Braslavskiy, I.Ya., Ishmatov, Z.Sh., Polyakov, V.N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy-efficient Asynchronous Electric Drive]. Moscow, Izdatel'skiy centr «Akademija», 2004. 256 p.
2. Anisimov, D.M., Sarvarov, I.A., Petushkov, M.Yu., Sarvarov, A.S. *Puskovoe ustroystvo trekhfaznogo vysokovol'tnogo elektrodvigatelya peremennogo toka* [Starting Device of Three-Phased High-Voltage Electric Motor of Alternating Current]. Svidetel'stvo RF na poleznuju model' [Certificate of Russia on Useful Model №82963], no. 82963, 2009.