

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ РЕАКТОРНО-ТИРИСТОРНЫХ ПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обоснована актуальность создания простейших по конструкции, малозатратных и энергоэффективных пусковых устройств для высоковольтных двигателей переменного тока. Приведены расчетные осциллограммы электромагнитного переходного момента при прямом и реакторном пуске, а также осциллограммы при различных начальных условиях переключения двигателя на сетевое напряжение. Дана оценка влияния на колебательность электромагнитного переходного момента двигателя моментов времени переключения его на сеть на завершающем этапе реакторного пуска. Обоснована возможность реализации коммутационного процесса практически с полным устранением колебаний электромагнитного переходного момента. Рассмотрены варианты решения проблемы «мягкого» переключения на напряжение сети в современных реакторных устройствах плавного пуска. Рассмотрена идея и схема реализации гибридного реакторно-тиристорного пускового устройства. Обоснована роль высоковольтного тиристорного коммутатора как устройства кратковременного действия, обеспечивающего практическое устранение колебаний переходного момента при переключении двигателя на сеть. Приведены результаты моделирования системы «Реакторно-пусковое устройство – асинхронный двигатель», дающие обоснование реализуемости практически полного устранения колебаний переходного момента при переключении двигателя на сеть на любой стадии пускового процесса.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, реакторный пуск, переходный электромагнитный момент, колебательность, благоприятный момент включения, реакторно-тиристорное устройство.

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня, когда на рынке электротехнической продукции представлен широкий ряд пусковых устройств, прямой пуск низковольтных двигателей мощностью свыше 100 кВт и высоковольтных мощностью свыше 800 кВт является признаком низкой технической культуры [1]. Для таких двигателей прямой пуск квалифицируется, как аварийно-опасный режим. Негативные процессы и последствия такого пуска общеизвестны.

В настоящее время на крупнейших металлургических предприятиях России нерегулируемые электроприводы мощностью свыше 250-300 кВт являются высоковольтными и не оснащены в своем большинстве устройствами плавного пуска. Следует отметить, что практически все мощные электроприводы переменного тока, введенные в эксплуатацию в эпоху индустриализации страны, были ориентированы при проектировании на пуск прямым подключением к сети. Эта традиция продолжилась затем и во второй половине XX-го века. В **таблице** приведены данные по количеству мощных двигателей переменного тока на Магнитогорском металлургическом комбинате [2, 3].

В целом по металлургической отрасли России эти данные могут быть представлены увеличенными на порядок и более, что подтверждает насколько актуальна проблема оснащения нерегулируемых электроприводов переменного тока в этой отрасли пусковыми устройствами.

**Количество двигателей переменного тока по группам мощности**

Группа мощности, кВт	В ПАО «ММК» [2]				
	100-250	250-500	500-1000	1000-5000	Свыше 5000
Количество, шт.	2686	812	553	394	80
Группа мощности, кВт	В ГОП ПАО «ММК» [3]				
	150-320	320-1000	Свыше 1000		
Количество, шт.	482	124	21		

В настоящее время для решения задач минимизации негативного влияния пусковых процессов на двигатель и питающую сеть наиболее эффективными являются преобразователи частоты (ПЧ) и пускатели на основе тиристорных регуляторов напряжения (ТРН). Однако стоимость таких устройств для высоковольтных АД продолжает оставаться высокой, что является серьезным препятствием для их широкого применения.

Реакторно-трансформаторные пускатели, ограничивая кратность пусковых токов и колебательную составляющую пускового момента, при затяжном пуске приводят к значительным тепловым потерям в двигателе. Для сокращения длительности пуска обычно производят раннее переключение двигателя на сеть, что приводит к заметным колебаниям переходного электромагнитного момента, кратность которых соизмерима с кратностью начального пускового момента.

В этой связи задачи, связанные с разработкой сравнительно недорогих способов и устройств пуска, основанных на применении реакторов, автотрансформаторов и других им подобных устройств токоограничения, не утратили свою актуальность.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

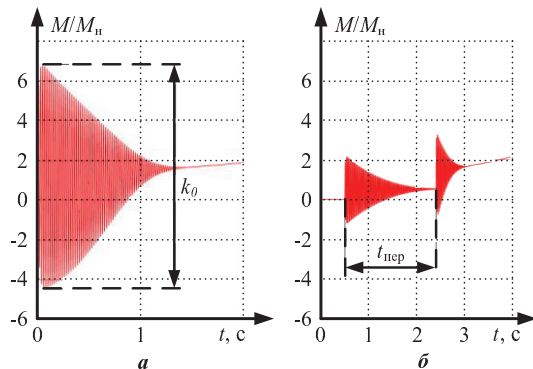
При пуске АД с ограничением питающего напряжения решаются две задачи: снижаются кратность размаха колебательной составляющей электромагнитного момента [4, 5] и пусковой ток статора. Однако, если пуск двигателя будет слишком затяжным, то пусковые потери могут вдвое и более превысить потери при прямом пуске [6]. На металлургических предприятиях питающие сети, как правило, являются мощными, что позволяет считать первостепенной задачей при пуске АД ограничение амплитуд ударных пусковых моментов (кратности размаха колебаний момента  $k_0$ ).

Как известно, реакторный пуск высоковольтных АД является двухступенчатым. Если двигатель пускают при нулевых начальных условиях, то характер переходных процессов на первой ступени пуска определяется только характеристиками двигателя и реактора [7]. Типичные расчетные зависимости переходного электромагнитного

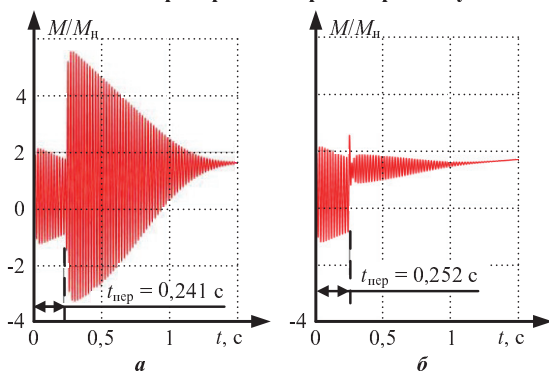
момента при прямом и реакторном пуске высоковольтного инерционного асинхронного электропривода представлены на **рис. 1**. Расчеты проведены для высоковольтного АД с  $P_n = 800$  кВт,  $U_n = 6$  кВ,  $M_n = 5100$  Н·м [4].

При переходе к реакторному пуску кратность размаха колебаний начального пускового момента  $k_0$  (**рис. 1, б**) снижается практически в 3 раза в сравнении с прямым пуском (**рис. 1, а**), что заметно снижает динамические нагрузки в механической части электропривода. Необходимо отметить, что в теории и практике применения реакторного пуска недостаточно исследованным остается вопрос о выборе времени переключения на сеть. Обычно рекомендуется осуществлять переключение на сеть при достижении ротором двигателя скорости, близкой к номинальному значению [4], что приводит к значительному увеличению длительности пуска и соответственно тепловых потерь в двигателе.

Переключение на сеть происходит при ненулевых условиях, которые в реакторном пуске не учитываются. На характер изменения переходного момента и соответственно тока статора, как известно [8], в значительной степени влияют условия (мгновенные значения тока и напряжения) в момент времени  $t_{пер}$ . На **рис. 2** приведены расчетные осциллограммы переходных электромагнитных моментов, полученные при различных начальных условия переключения на напряжение питающей сети. Осциллограмма на **рис. 2, а** соответствует неблагоприятным начальным условиям переключения. В этом случае размах колебаний достигает 8-кратных значений. При благоприятных начальных условиях (**рис. 2, б**) размах колебаний переходного электромагнитного момента снижается до малозначимых величин. Интервал между указанными моментами времени переключения на сетевое напряжение на **рис. 2** составляет всего 0,011 с, т.е. практически половину периода питающего напряжения сети.



**Рис. 1.** Расчетные зависимости электромагнитного момента при прямом и реакторном пуске



**Рис. 2.** Расчетные зависимости электромагнитного момента при различных начальных условиях переключения на напряжение сети

Задача правильного выбора момента переключения особенно важна, поскольку он является единственным управляемым параметром при реакторном пуске. Современные типовые промышленно-выпускаемые устройства реакторного пуска не обеспечивают техническую реализацию процесса переключения при благоприятных моментах времени  $t_{пер}$ . Время срабатывания высоковольтных выключателей обычно составляет 5-10 периодов питающего напряжения.

На пути совершенствования реакторных пусковых устройств в качестве главных задач следует выделить:

1. Обеспечение переключения АД при благоприятных условиях для переключения двигателя на сетевое напряжение с полным устранением колебательной составляющей переходного момента
2. Оптимизация длительности реакторного пуска АД по минимуму потерь в двигателе.

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Сокращение длительности пуска не только способствует снижению потерь в двигателе, но и позволяет применить реактор с меньшими массогабаритными показателями. Часто габаритные размеры пускового реактора являются сдерживающим фактором для их внедрения [9]. Действительно, на практике реакторы достаточно включить на несколько секунд – до установления по условиям питающей сети допустимой кратности тока статора. В [9] предлагается шунтировать реактор при установлении номинального тока и ограничивать ток статора в пусковом режиме [10] на уровне 2,0-3,0  $I_n$ . Длительность пуска при этом не превышает 10 с. За этот интервал времени можно допустить кратковременный перегрев обмотки реактора.

Группой «РУСЭЛТ» предложено реакторное устройство плавного пуска СПРИНТ-В-Р [11], в котором предусмотрена дополнительная обмотка подмагничивания с тиристорной группой управления. В начальный момент при пуске электродвигателя подмагничивание отсутствует и индуктивное сопротивление пускового тока на уровне 1,5-3  $I_{ном}$ . В последующем, при снижении пускового тока электродвигателя происходит увеличение тока подмагничивания, которое обеспечивает удержание тока электродвигателя на том же уровне. После разгона двигателя (падение тока ниже 3  $I_{ном}$ ) ток подмагничивания достигает максимального значения, при этом индуктивное сопротивление реактора становится минимальным. Длительность пуска с применением данного устройства регламентируется пределами 50-110 с. Пуск завершается шунтированием реактора.

Благоприятный процесс перехода на сетевое напряжение обеспечивает, как показали исследования, трансформаторно-тиристорный пускатель [5, 12-14], основным недостатком его является значительный ток через тиристорный коммутатор во вторичной низковольтной обмотке. Однако при кратковременном регулировании этот недостаток является не столь значимым.

В данной статье предлагается к рассмотрению идея создания гибридного реакторно-тиристорного пускового устройства, принципиальная схема которого приведена на **рис. 3**.

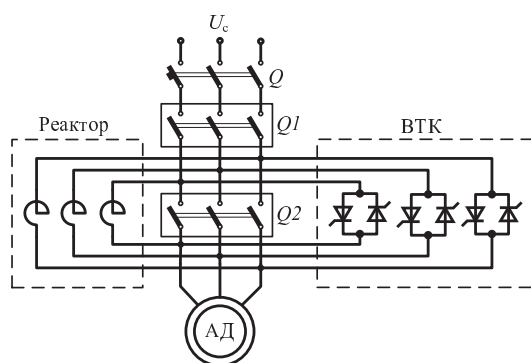


Рис. 3. Принципиальная схема гибридного реакторно-тиристорного пускового устройства

По окончании этапа реакторного пуска переход на сетевое напряжение осуществляется шунтированием реактора автоматическим выключателем  $Q_2$ . Среднее время срабатывания высоковольтного (вакуумного или масляного) выключателя, как уже отмечалось, составляет в среднем 0,2-0,25 с. Естественный разброс длительности коммутации вакуумного выключателя не позволяет решить задачу подключения двигателя на полное напряжение в благоприятные моменты времени. По этой причине предлагается дополнительно применить высоковольтный тиристорный коммутатор (ВТК) как устройство кратковременного действия с длительностью рабочего времени менее 0,5 с. При этом требования к данному устройству и его стоимостные показатели могут заметно снижены в сравнении с традиционными полупроводниковыми устройствами пуска.

ВТК, синхронизированный с сетью, позволит на интервале времени срабатывания высоковольтного выключателя реализовать предварительное подключение двигателя к сети в благоприятный момент времени в течение времени срабатывания  $Q_2$ . После его срабатывания реактор и тиристорный коммутатор шунтируются контактами выключателя  $Q_2$  и естественным образом выводятся из работы. На рис. 4 приведены результаты моделирования данного процесса.

На рис. 4, а показан процесс при изменении угла управления тиристорами по закону  $\alpha=90\exp(-0,5t)$ , при этом наблюдаются колебания момента с кратностью размаха  $0,6M_n$ . При изменении угла управления по закону  $\alpha=150\exp(-2t)$  на момент шунтирования реактора возникают более благоприятные начальные условия, о чем свидетельствует характер изменения переходного момента на рис. 4, б. Процесс шунтирования реактора начинается в момент времени  $t_{пер}$  завершается без колебаний момента. Длительность работы ВТК при этом составляет не более половины периода.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Гибридное пусковое устройство на основе реактора и высоковольтного тиристорного коммутатора позволяет осуществить переключение АД на сетевое напряжение на любом интервале процесса пуска с целью оптимизация длительности реакторного пуска АД по минимуму потерь в двигателе.

2. Исследования показали, что при кратковременном действии высоковольтного тиристорного коммутатора технически реализуется возможность обеспечения благоприятного момента времени переключения двигателя на сетевое напряжение с полным устранением колебательной составляющей переходного момента.

3. Время работы тиристорного коммутатора не превышает 0,5 с, что требует разработки новой концепции по созданию тиристорного пускового устройства кратковременного действия.

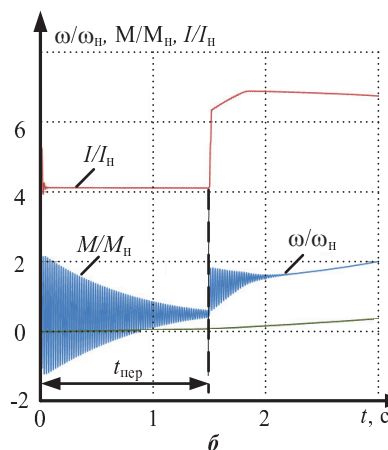
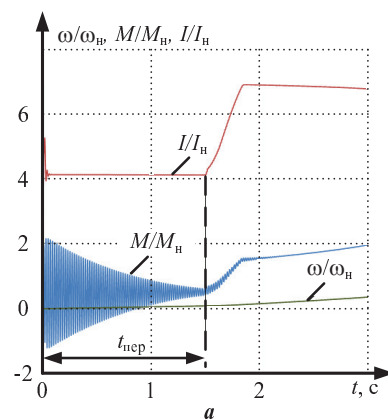


Рис. 4. Расчетные зависимости электромагнитного момента при реализации реакторного пуска с ВТК

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Значение автоматизированного электропривода для модернизации экономики // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу. Иваново, 2012. С. 4-9.
2. Осипов О.И., Славгородский В.Б. Состояние и перспективы модернизации автоматизированного электропривода прокатных станов в черной металлургии // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск, 14-17 сентября 2004 г.). Ч. 1. Магнитогорск, 2004. С. 16-23.
3. Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Вечеркин М.В. Основы построения трансформаторно-тиристорных пусковых устройств для высоковольтных асинхронных электроприводов: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 105 с.
4. Оценка колебательной составляющей переходного момента и выбор времени переключения на сеть при реакторном пуске высоковольтных асинхронных электроприводов / Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Макаров А.В., Фахритдинова Г.М. // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». 2016. Т.16. №4. С. 84-88.
5. Моделирование пусковых процессов асинхронных двигателей при использовании тиристорных регуляторов напряжения, реакторов, автотрансформаторов и трансформаторно-тиристорных пусковых устройств / Славгородская Е.В., Славгородский В.Б., Сарваров И.А., Вечеркин М.В. // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново, 2012. С. 350-355.

6. Энергосберегающий асинхронный электропривод / Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
7. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / Соколов М.М., Петров Л.П., Масандилов Л.Б., Ладензон В.А. М.: Энергия, 1967. 201 с.
8. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей: М.: Энергоиздат, 1981. 184 с.
9. Пат. 2407139 Российская Федерация, МПК H02P1/28, H01F21/00, H01F29/04. Устройства плавного пуска электродвигателя переменного тока и реактор для указанного устройства / Барский В.А. Заявл. 10.03.2009; опубл. 20.12.2010.
10. Барский В.А., Быканов Р.К. Опыт разработки и применения серии устройств плавного пуска типа РУПП // Электромеханічні І енергозберігаючі системи. Вып. 3/2012 (19). С. 86-89.
11. [www.ruselt.ru/catalogs/ruselt-catalog-ac-dc.pdf](http://www.ruselt.ru/catalogs/ruselt-catalog-ac-dc.pdf)
12. Инновационные разработки ГОУ ВПО «МГТУ» в области создания высокочастотных и энергосберегающих электроприводов / Селиванов И.А., Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Сарваров А.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. № 2. С. 42-48.
13. Пусковое устройство трехфазного высоковольтного электродвигателя переменного тока: Свидетельство РФ на полезную модель №82963 / Анисимов Д.М., Сарваров И.А., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Опубл. в БИМП. 2009. №3.
14. Вечеркин М.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей // Вестник Ивановского государственного технического университета. 2013. Вып. 1. С. 88-91.

Поступила в редакцию 07 декабря 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### PECULIARITIES OF IMPLEMENTATION OF HYBRID THYRISTER-REACTOR AC MOTOR STARTERS

Anwar S. Sarvarov

D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Maksim V. Vecherkin

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, the Department of physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Irina Yu. Bogacheva

Assistant Professor, the Department of physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Ekaterina S. Petryakova

Undergraduate of the Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Eng.), Professor, the Department of Electronics and Microelectronics Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The paper rationalizes the relevance of the development of a high-voltage ac motor starter that is simple in construction, low cost and energy effective. It also presents the calculated oscillograms of the electromagnetic transient moment, when the reactor or across-the-line starting of a motor takes place, and the oscillograms at various initial conditions of switching the motor to the supply-line voltage. It is estimated how the timing of switching the engine to the supply-line voltage influences the oscillation of the electromagnetic transient moment at the final stage of the reactor start. The paper also verifies the possibility of the switch process implementation with an almost complete elimination of the oscillation of the electromagnetic transient moment and discusses the ways of solving the problem of the soft switching of a reactor device with a soft start to the line voltage. The idea and the scheme of the implementation of a hybrid thyristor-reactor of a motor starter is estimated and discussed. The role of the high voltage thyristor switch considered as a device of short time action that provides some practical elimination of the oscillation of the electromagnetic transient moment when switching to the supply-line voltage, is rationalized as well. The paper discusses the results of simulating the system "Reactor start device as an induction motor", verifying the possibility of complete elimination of the oscillation of the electromagnetic transient moment when switching the engine to the supply-line voltage at any stage of the starting process.

**Keywords:** Asynchronous motor, reactor start-up, transient electromagnetic moment, oscillation, favorable switching point, reactor-thyristor device

#### REFERENCES

1. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. The importance of the automatic electric drive to the modernization of the economy. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International (the 7<sup>th</sup> All-Russian) Scientific and Technical Conference on the automatic electric drive. Ivanovo, 2012, pp 4-9. (In Russian)
2. Osipov O.I., Slavgorogsky V.B. The current state and perspectives of modernization of the automatic electric drive for rolling mills in ferrous metallurgy. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International (the 15<sup>th</sup> All-Russian) Conference on the automatic electric drive "The automatic electric drive in the 21<sup>st</sup> century: ways of development", part 1, Magnitogorsk, 2004, pp. 16-23. (In Russian)
3. Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Vecherkin M.V. *Osnovy postroeniya transformatorno-tiristornykh puskovykh ustroystv dlya vysokovol'tnykh asinkhronnykh elektroprivodov* [Fundamentals of the construction of transformer thyristor startup systems for high voltage asynchronous drives]. Magnitogorsk, 2013, 105 p. (In Russian)
4. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Makarov A.V., Fachretdinova G.M. The assessment of the oscillating term of the

- transient moment and the timing of switching to the supply-line voltage at reactor start of high voltage asynchronous electric drives. *Vestnik YuUrGU. Ser. «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Power engineering"], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 84-88. (In Russian)
5. Slavgorodskaya E.V., Slavgorogsky V.B., Sarvarov I.A., Vecherkin M.V. Modelling of the startup process of asynchronous engines when using thyristor voltage regulators, reactors, autotransformers and transformer thyristor startup systems. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International (the 7<sup>th</sup> All-Russian) Scientific and Technical Conference on the automatic electric drive. Ivanovo, 2012, pp. 350-355. (In Russian)
  6. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy saving asynchronous electric drive]. Moscow, Academy, 2004. 256 p. (In Russian)
  7. Sokolov M.M., Petrov L.P., Masandilov L.B., Ladenson V.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v asinkhronnom elektroprivode* [Electromagnetic transients in an asynchronous engine], Moscow, 1967, 201 p. (In Russian)
  8. Petrov L.P. *Upravlenie puskom i tormozheniem asinkhronnykh dvigateley* [Start-stop control of asynchronous engines], Moscow, 1981, 184 p. (In Russian)
  9. Barsky V.A. *Ustroystva pлавного пуска электродвигателя переменного тока i реактор dlya ukazannogo ustroystva* [The reduced-current starter of an ac motor and its reactor]. Patent RF, no. 2407139, 2010.
  10. Barsky V.A., Bikanov R.K. Development and implementation of a series of reduced-current starters. *Elektromekhanichni I energozberigayuchi sistemi* [Electromechanical low power systems], 2012, iss. 3(19).
  11. [www.ruselt.ru/catalog/ruselt-catalog-ac-dc.pdf](http://www.ruselt.ru/catalog/ruselt-catalog-ac-dc.pdf)
  12. Selivanov I.A., Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Sarvarov A.S. Innovations Of NMSTU in the field of the development of highly dynamic energy efficient electric drives. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no. 2, pp. 42-48. (In Russian)
  13. Anisimov D.M., Sarvarov I.A., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. *Puskovoe ustroystvo trekhfaznogo vysokovol'tnogo elektrodvigatelya peremennogo toka* [The startup system of a three phase high-voltage ac motor]. The certificate on the utility model № 82963, 2009, no. 3.
  14. Vecherkin M.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. Capacity of the transformer thyristor structure as a startup system of high voltage asynchronous drives. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Technical University], 2013, iss. 1, pp. 88-91. (In Russian)

Сарваров А.С., Вечеркин М.В., Петрякова Е.С., Богачева И.Ю., Петушков М.Ю. Особенности реализации гибридных реакторно-тиристорных пусковых устройств для двигателей переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 9-13. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-9-13](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-9-13)

Sarvarov A.S., Vecherkin M.V., Bogacheva I.Yu., Petryakova E.S., Petushkov M.Yu. Peculiarities of Implementation of Hybrid Thyristor-Reactor AC Motor Starters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 9-13. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-9-13](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-9-13)