

ОЦЕНКА КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПЕРЕХОДНОГО МОМЕНТА И ВЫБОР ВРЕМЕНИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НА СЕТЬ ПРИ РЕАКТОРНОМ ПУСКЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, А.В. Макаров, Г.М. Фахритдинова

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

При реакторном пуске асинхронных электроприводов время переключения на сеть является единственным регулируемым параметром. При переключении на сеть в конце пускового режима возрастают тепловые потери в двигателе, при ранних переключениях – возникают значительные по величине ударные электромагнитные моменты. Обоснованный выбор времени переключения требует детального анализа электромагнитных процессов в двигателе. В работе приводятся результаты теоретических исследований, позволяющих осуществить выбор времени переключения, при котором минимизируется негативное влияние колебательной составляющей момента и повышенного тепловыделения при пуске. Введены универсальные критерии оценки колебательности переходного момента двигателя на основе интегрального параметра – среднеквадратичного значения колебательной составляющей электромагнитного момента за время пуска двигателя.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, реакторный пуск, электромагнитный момент, колебательная составляющая, время переключения.

Актуальность проблемы и постановка задачи

Для нерегулируемых высоковольтных электроприводов значительной мощности характерно практическое отсутствие устройств плавного пуска, несмотря на то, что в мировой практике прямой пуск низковольтных двигателей мощностью свыше 100 кВт и высоковольтных двигателей мощностью свыше 800 кВт является признаком низкой технической культуры [1]. Для таких двигателей прямой пуск квалифицируется как аварийно-опасный режим эксплуатации. Асинхронный двигатель (АД), как известно, при пуске и переключениях в статорной цепи развивает значительные по величине электромагнитные моменты колебательного характера. Возникающие механические напряжения в звеньях кинематической цепи снижают показатели надежности системы электропривода.

Оценочные критерии перегрузок могут быть получены из анализа осциллограмм электромагнитного момента АД, представленных в относительных единицах [2].

На рис. 1 в относительных единицах приведена расчетная осциллограмма, иллюстрирующая характер колебательной составляющей момента при прямом пуске инерционного электропривода, оснащенного высоковольтным АД с $P_n = 800$ кВт, $U_n = 6$ кВ, $M_n = 5100$ Н·м.

Перегрузки по моменту при прямом пуске можно охарактеризовать кратностью размаха колебаний момента k_0 :

$$k_0 = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_n}, \quad (1)$$

где M_{\max} и M_{\min} – максимальное и минимальное амплитудные значения колебаний электромагнитного момента.

Для ограничения динамических нагрузок при пуске и снижения значения параметра k_0 используются различные способы облегчения пуска [3]. Стоимость высоковольтных устройств плавного пуска, построенных на основе полупроводниковых преобразователей, продолжает оставаться высокой, что препятствует их широкому применению. Поэтому для высоковольтных инерционных электроприводов продолжают оставаться актуальными сравнительно недорогие способы, связанные с использованием реакторных и автотрансформаторных пусковых устройств, позволяющих снизить величины экстремальных пусковых воздействий до безопасного уровня.

Реакторный пуск является традиционным и достаточно хорошо исследованным способом облегчения пуска высоковольтных АД. Методика выбора реактора для конкретных условий применения подробно описана в специальной литературе. В то же время недостаточно исследованным является вопрос о выборе времени переключения на сеть. Стандартной является рекомендация о переключении на сеть при достижении ротором двигателя скорости близкой к номинальному значению [4]. Однако в этом случае время пуска и соответственно тепловые потери возрастают. Поэтому для снижения тепловых потерь время переключения следует выбирать по возможности малым.

Как известно, реакторный пуск высоковольтных АД является двухступенчатым. Если двига-

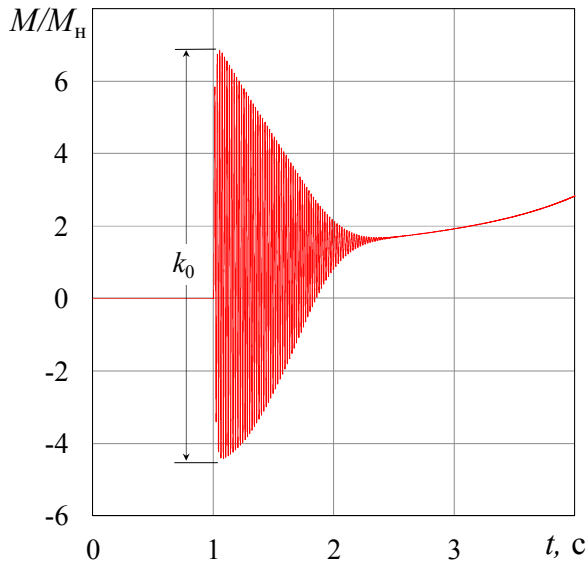


Рис. 1. Расчетная осциллограмма электромагнитного момента при прямом пуске: k_0 – кратность размаха электромагнитного момента

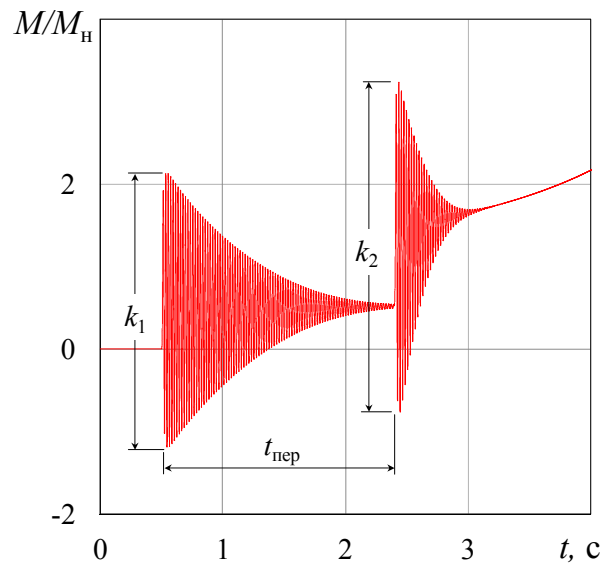


Рис. 2. Расчетная осциллограмма электромагнитного момента при реакторном пуске

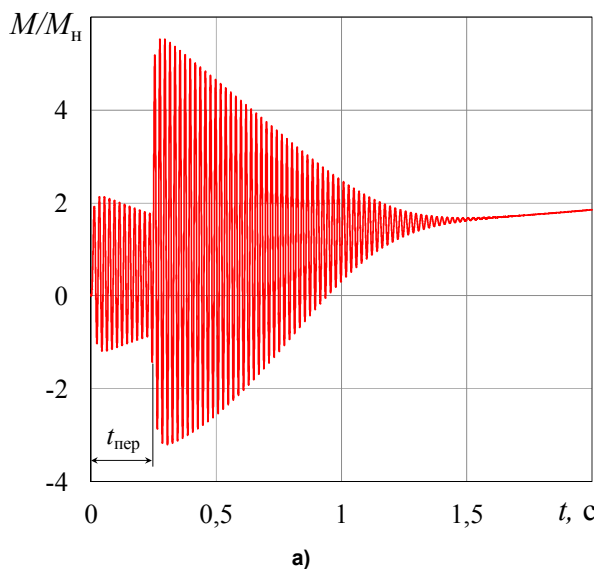
тель пускают при нулевых начальных условиях, то характер переходных процессов на первой ступени пуска определяется только характеристиками двигателя и реактора [5]. Типичные расчетные осциллограммы переходного электромагнитного момента при реакторном пуске высоковольтного инерционного асинхронного электропривода представлены на рис. 2 [6].

На второй ступени начальные условия отличны от нулевых и характер переходных процессов в значительной степени будет определяться временем переключения на сеть $t_{пер}$. Особенно сильное влияние значение $t_{пер}$ оказывает на электромагнитный момент двигателя.

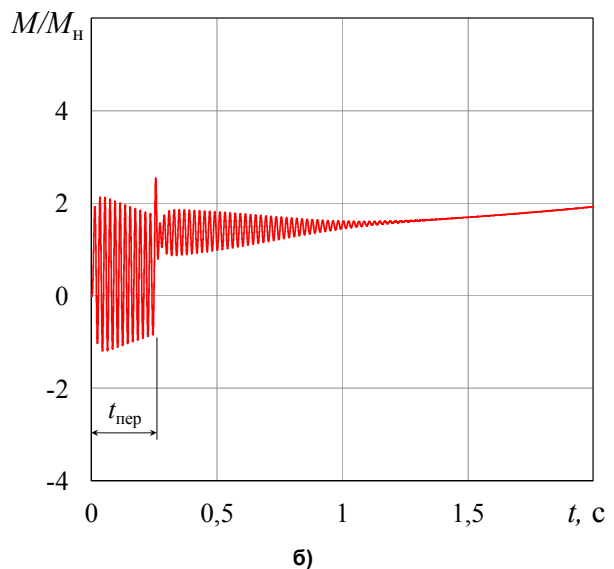
По аналогии с прямым пуском влияние переходного момента можно оценить с помощью параметра (1) для каждой из пусковых ступеней (k_1 и k_2 на рис. 2). Значение k_1 при нулевых начальных условиях не зависит от момента коммутации на сеть и от времени переключения. Значение этого параметра однозначно определяется характеристиками реактора.

Величина k_2 зависит от момента переключения и может быть как больше, так и меньше k_1 (рис. 3, а, б).

Задача правильного выбора момента переключения является особенно важной, поскольку он является единственным управляемым параметром



а)



б)

Рис. 3. Расчетные осциллограммы колебаний момента при различных значениях времени переключения: а – $t_{пер} = 0,241$ с; б – $t_{пер} = 0,252$ с

ром при реакторном пуске. При этом типичные промышленно выпускаемые устройства реакторного пуска обеспечивают возможность выбора $t_{\text{пер}}$ в широком диапазоне от 0,1 до 99 с.

Таким образом, при реакторном пуске актуальной является задача выбора времени переключения на сеть, при котором, с одной стороны, минимизируется значение параметра k_2 , а с другой стороны – тепловые потери в двигателе находятся в пределах допустимых значений.

Исследования

Для изучения характера изменения параметра k_2 была использована компьютерная модель системы электропривода «пусковой реактор – асинхронный электродвигатель – вентилятор», позволяющая исследовать пусковые процессы [7]. Исходными являются паспортные данные высоковольтного асинхронного двигателя и центробежного вентилятора с моментом инерции рабочего колеса $J = 250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Исследовался пуск с применением реактора, обеспечивающего двукратное снижение пускового тока и рассчитанного по условиям нагрева на кратковременную работу.

Расчет значений k_2 проводился от начального значения $t_{\text{пер}} = 0,1 \text{ с}$ с интервалом времени 1 мс. В результате был получен массив значений параметра k_2 от момента времени переключения для различных начальных условий переключения на сеть. Графики зависимости функции $k_2(t_{\text{пер}})$ представлены на рис. 4. Пунктиром показаны кратность размаха колебательной составляющей при прямом пуске k_0 и кратность размаха колебательной составляющей первой ступени реакторного пуска k_1 .

В области малых значений $t_{\text{пер}}$ параметр k_2 подвержен значительным колебаниям с периодом сетевого напряжения, что обусловлено различием в начальных условиях при переключении на сеть. При строго одновременной коммутации фаз колебания k_2 убывают по мере увеличения $t_{\text{пер}}$ и прекращаются при некотором значении t' близком к длительности колебательной составляющей момента первой ступени пуска. При $t_{\text{пер}} > t'$ величина k_2 монотонно уменьшается.

Как уже отмечалось, для снижения тепловых потерь необходимо минимизировать время переключения. Однако из приведенных графиков видно, что выбор малых значений $t_{\text{пер}}$ не рационален, поскольку в этом случае параметр k_2 может достигать значительных величин и негативное влияние переходных процессов становится соизмеримым с условиями прямого пуска (см. рис. 3, а). Коммутация на сеть при минимальных значениях параметра k_2 вызывает затруднения с технической точки зрения, ввиду недостаточного быстродействия коммутационной аппаратуры. Таким образом, при выборе времени переключения следует рекомендовать соблюдение условия:

$$t' \leq t_{\text{пер}} \leq t'' \quad (2)$$

Выбор нижней границы диапазона (2) является предпочтительным, поскольку обеспечивает минимальные тепловые потери при удовлетворительной степени снижении размаха ударного электромагнитного момента [6]. Необходимо учитывать факт, что в реальных условиях эксплуатации неодновременность коммутации фаз может оказывать значимое влияние на характер зависимости $k_2(t_{\text{пер}})$. На рис. 3, б показан пример такого влия-

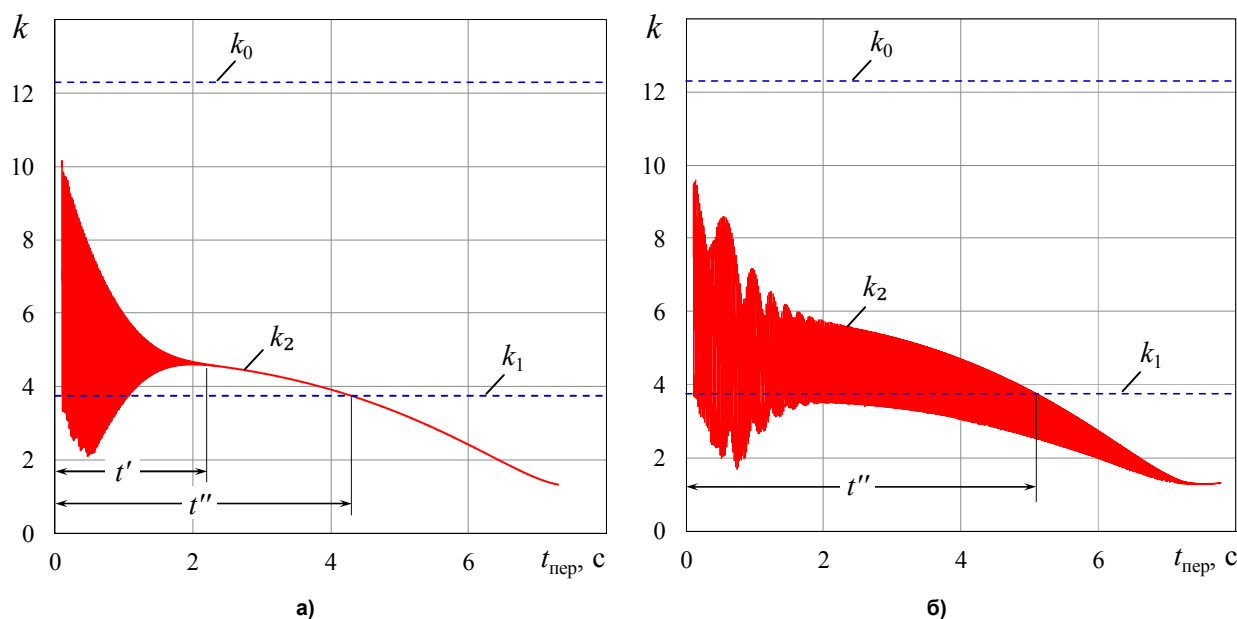


Рис. 4. Зависимость кратности размаха колебательной составляющей электромагнитного момента от времени переключения: а – одновременная коммутация фаз; б – задержка коммутации одной фазы на 2 мс

Таблица

Способ пуска	$M_{скз}$, Н·м	k_{M_0}
Прямой пуск (рис. 1)	4310	1,0
Реакторный пуск, $t_{пер} = 2,2$ с (рис. 2)	1420	0,33
Реакторный пуск, $t_{пер} = 0,241$ с (рис. 3, а)	3230	0,749
Реакторный пуск, $t_{пер} = 0,252$ с (рис. 3, б)	950	0,22

ния при задержке коммутации одной из фаз сетевого напряжения на второй ступени пуска. Выбор границ диапазона (2) в этом случае следует проводить по верхней огибающей зависимости $k_2(t_{пер})$.

Таким образом, кратность размаха ударного момента (1) является удобным для анализа параметром, позволяющим наглядно оценить степень негативного влияния колебательной составляющей при прямом и реакторном пуске. Однако в целом данный параметр недостаточно информативен, поскольку не учитывает количество бросков переходного электромагнитного момента и длительность колебательного процесса, которые могут достигать больших значений и являются важными факторами, определяющими негативное влияние пускового процесса на техническое состояние двигателя. Кроме этого указанный параметр не позволяет производить сравнительный анализ различных способов и режимов пуска.

Для более достоверной оценки влияния колебательной составляющей могут быть использованы критерии, предложенные в работах [2, 8]. Базисом для таких критериев является интегральный параметр – среднеквадратичное значение (СКЗ) колебательной составляющей электромагнитного момента за время пуска АД:

$$M_{скз} = \sqrt{\frac{1}{t_{пуск}} \int_0^{t_{пуск}} (M(t))^2 dt}, \quad (3)$$

где $M(t)$ – зависимость колебательной составляющей момента от времени.

Параметр $M_{скз}$ является интегральным и учитывает количество бросков переходного электромагнитного момента, а также длительность переходных процессов вне зависимости от способа пуска и выбранного режима управления пусковым устройством.

Для анализа реакторного пуска удобен относительный критерий – кратность СКЗ колебательной составляющей относительно СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске:

$$k_{M_0} = \frac{M_{скз}}{M_{скз0}}, \quad (4)$$

где $M_{скз0}$ – СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске.

Этот критерий показывает, какова доля СКЗ колебательной составляющей при выбранном способе пуска по отношению к СКЗ колебательной составляющей при прямом пуске. В таблице приведены значения критериев $M_{скз}$ и k_{M_0} для прямого и реакторного пуска при различных значениях времени переключения.

Различия в численных значениях критериев достаточно отчетливы и хорошо соотносятся с субъективной визуальной оценкой расчетных осциллограмм. Расчет критериев (3) и (4) в широком диапазоне времени переключения позволяет построить графики, аналогичные приведенным на рис. 4, и графически осуществить выбор значения $t_{пер}$.

Важнейшим свойством критериев (3) и (4) является возможность сравнивать не только режимы, но и различные способы пуска: реакторный, автотрансформаторный, плавный пуск с помощью тиристорного регулятора напряжения (ТРН) или трансформаторно-тиристорного пускового устройства [9, 10]. Сравнение прямого, реакторного и плавного пуска с помощью ТРН проведено в работе [8], где показана высокая информативность и чувствительность интегральных критериев к изменениям условий пуска.

Выводы

1. Для эффективного применения реакторного пуска мощных АД необходимо обеспечить условия переключений в статорной цепи, снижающие показатели колебательности электромагнитного момента в переходных режимах.

2. Кратность размаха электромагнитного момента k является наглядным параметром, позволяющим осуществить обоснованный выбор времени переключения на сеть при реакторном пуске высоковольтных асинхронных двигателей.

3. При выборе времени переключения на сеть следует руководствоваться условием $t' \leq t_{пер} \leq t''$, обеспечивающим снижение негативного влияния колебательной составляющей электромагнитного момента двигателя при сохранении допустимых условий нагрева.

4. Интегральные критерии $M_{скз}$ и k_{M_0} являются универсальным средством количественной оценки колебаний момента для различных способов и режимов пуска. Их использование применительно к реакторному пуску позволяет количественно оценить степень снижения негативного влияния переходных процессов по отношению к прямому пуску.

Литература

1. Онищенко, Г.Б. Значение автоматизированного электропривода для модернизации экономики / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков // Труды VII Международной (VII Всероссийской) научно-тех-

нической конференции по автоматизированному электроприводу. – Иваново, 2012. – С. 4–9.

2. Сравнительная оценка способов пуска асинхронных двигателей по колебательной составляющей электромагнитного момента / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.В. Макарьева, А.В. Макаров // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 / отв. за вып. И.В. Гуляев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Т. 1. – С. 197–202.

3. Петров, Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л.П. Петров. – М.: Энергоиздат, 1981. – 184 с.

4. Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – Изд. 6-е, испр. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.

5. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.Б. Масандилов, В.А. Ладензон. – М.: Энергия, 1967 – 201 с.

6. Выбор времени переключения на сеть при реакторном пуске мощных асинхронных электроприводов / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.С. Петрякова и др. // Труды Международной XVI научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. – С. 179–183.

7. Компьютерная модель для исследования пусковых процессов в асинхронных электроприводах / Е.С. Петрякова, И.Н. Идрисов, А.Б. Лымарь, М.В. Вечеркин // Автоматизированные технологии и производства: междунар. науч.-техн. журн. – Май 2015. – № 2 (8). – С. 14–16.

8. Критерии оценки колебательной составляющей электромагнитного момента при пуске высоковольтных асинхронных двигателей / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, Е.С. Петрякова и др. // Труды Международной XVI научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2015. – С. 183–186.

9. Сарваров, А.С. Основы реализации трансформаторно-тиристорных пусковых устройств для высоковольтных асинхронных электроприводов / А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, М.В. Вечеркин. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – 105 с.

10. Вечеркин, М.В. Возможности трансформаторно-тиристорной структуры как пускового устройства высоковольтных асинхронных двигателей / М.В. Вечеркин, М.Ю. Петушков, А.С. Сарваров // Вестник Ивановского государственного технического университета. – 2013. – Вып. 1. – С. 88–91.

Вечеркин Максим Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; vecherkin@inbox.ru.

Сарваров Анвар Сабулханович, д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; anvar@magtu.ru.

Макаров Александр Валерьевич, аспирант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; makarov@mgn.ru.

Фахритдинова Гузель Мавлитовна, магистрант кафедры автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; guzelchka17@gmail.com.

Поступила в редакцию 7 декабря 2016 г.

ASSESSMENT OF OSCILLATING COMPONENT OF TRANSIENT MOMENT AND SELECTION OF NETWORK SUPPLY SWITCHOVER TIME AT REACTOR START OF HIGH-VOLTAGE ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES

M.V. Vecherkin, vecherkin@inbox.ru,

A.S. Sarvarov, anvar@magtu.ru,

A.V. Makarov, makarov@mgn.ru,

G.M. Fakhritdinova, guzelchka17@gmail.com

G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The time of switchover to the network supply is the only controlled parameter at reactor start of powerful asynchronous drives. Switchover to the network supply at the end of the starting mode is accompanied by increasing motor heat losses, while early switchovers are followed by significant impact electromagnetic torques. Justified selection of the switchover time requires a detailed analysis of electromagnetic processes in a motor. The paper demonstrates results of theoretical investigations enabling selection of the switchover time, which can minimize an adverse influence of the oscillating torque component and increased heat generation during start. The authors introduce universal criteria for assessment of motor transient moment oscillation based on the integral parameter – root-mean-square value of the oscillating component of the electromagnetic torque at motor start-up time.

Keywords: asynchronous electric drives, reactor start, electromagnetic torque, oscillatory component, switchover time.

References

1. Onishchenko G.B., Yun'kov M.G. [Significance of Automated Electric Drive for Economy Modernization]. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (VII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Proceedings of the 7th International (7th Russian) Scientific and Technical Conference Devoted to Automated Electric Drive], Ivanovo, 2012, pp. 4–9. (in Russ)
2. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Makarcheva E.V., Makarov A.V. [Comparative Assessment of Start Methods for Induction Motors Based on Oscillating Component of Electromagnetic Torque]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014* [Proceedings of the 8th International (9th Russian) Conference Devoted to Automated Electric Drive, AEP-2014]. Saransk, Mordovian University Publ., 2014, vol. 1, pp. 197–202. (in Russ)
3. Petrov L.P. *Upravlenie puskom i tormozheniem asinkhronnykh dvigateley* [Asynchronous Motor Start and Braking Control]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 184 p.
4. Veshenevskiy S.N. *Kharakteristiki dvigateley v elektroprivode. Izd.6-e, ispravlennoe* [Motor Properties in Electric Drive]. Moscow, Energoizdat Publ., 1977. 432 p.
5. Sokolov M.M., Petrov L.P., Masandilov L.B., Ladenzon V.A. *Elektromagnitnye perekhodnye protsessy v asinkhronnom elektroprivode* [Electromagnetic Transient Processes in Asynchronous Electric Drive]. Moscow, Energiya Publ., 1967. 201 p.
6. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Petryakova E.S., Makarcheva E.V., Makarov A.V. [Selection of Network Supply Switchover Time at Reactor Start of Powerful Asynchronous Electric Drives]. *Trudy Mezhdunarodnoy XVI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"* [Proceedings of the 16th International Scientific and Technical Conference "AC Electric Drives"]. Ekaterinburg, Ural Federal University Named after the First Russian President Boris Yeltsin Publ., 2015, pp. 179–183. (in Russ)
7. Petryakova E.S., Idrisov I.N., Lyamar' A.B., Vecherkin M.V. [Computational Model for Study of Start Processes in Asynchronous Electric Drives]. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva, Mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskyy zhurnal* [Automated Processes and Manufacturing Engineering: International Scientific and Technical Journal], vol. 2 (8), 2015, pp. 14–16. (in Russ)
8. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Petryakova E.S., Makarcheva E.V., Makarov A.V. [Criteria for Assessment of Electromagnetic Torque Oscillation Component at Start of High-Voltage Asynchronous Motors]. *Trudy Mezhdunarodnoy XVI nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"* [Proceedings of

the 16th International Scientific and Technical Conference “AC Electric Drives”]. Ekaterinburg, Ural Federal University Named after the First Russian President Boris Yeltsin Publ., 2015, pp. 183–186. (in Russ)

9. Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Vecherkin M.V. *Osnovy realizatsii transformatorno-tiristornykh puskovykh ustroystv dlya vysokovol'tnykh asinkhronnykh elektroprivodov* [Fundamentals of Implementation of Start-up Transformer and Frequency Converters for High-Voltage Asynchronous Electric Drives]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013. 105 p.

10. Vecherkin M.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. [Functionality of Transformer and Frequency Converter Design as a Start-up Unit for High-Voltage Asynchronous Electric Drives]. *Bulletin of the Ivanovo State Technical University*, 2013, vol. 1, pp. 88–91. (in Russ)

Received 7 December 2016

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Оценка колебательной составляющей переходного момента и выбор времени переключения на сеть при реакторном пуске высоковольтных асинхронных электроприводов / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, А.В. Макаров, Г.М. Фахритдинова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 84–90. DOI: 10.14529/power160411

FOR CITATION

Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Makarov A.V., Fakhritdinova G.M. Assessment of Oscillating Component of Transient Moment and Selection of Network Supply Switchover Time at Reactor Start of High-Voltage Asynchronous Electric Drives. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 84–90. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160411