УДК 621.313.333.2

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE IMMUNITY OF INDUCTION MOTORS

Воронин Вячеслав Андреевич,
аспирант, e-mail: VoroninVA670@yandex.ru
Vyacheslav A. Voronin, graduate student

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

***Аннотация**: Целью данной работы является обзорный анализ влияния различных факторов на живучесть асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором под воздействием электромагнитных помех.*

В статье рассмотрено влияние режимных параметров, условий окружающей среды и характеристик самих электродвигателей на их помехоустойчивость. Описан механизм влияния отклонений напряжения, несимметрии и несинусоидальности напряжения на их работу. Рассмотрен характер влияния каждого фактора на помехоустойчивость электродвигателей. Выполнен анализ областей допустимой работы асинхронных двигателей, показан их теоретический вид и описан характер влияния на них различных факторов.

В заключении статьи сделаны выводы о существенном влиянии рассмотренных факторов на помехоустойчивость асинхронных двигателей и необходимости их учета для корректного определения допустимых уровней электромагнитных помех.

***Abstracts**: The aim of this paper is to analyze the impact of various factors on the vitality of the induction motor with squirrel-cage rotor under the influence of electromagnetic interference.*

The article considers the influence of operating parameters, environmental conditions and characteristics of the motors themselves on their noise immunity. The mechanism of influence of voltage deviation, voltage unbalance and harmonic to the motors operation, are described. The nature of the influence of each factors on the noise immunity of electric motors, are considered. The region of allowable operation of induction motors, their theoretical views and the impacts on them of various factors, are analyzed.

At the end of the article conclusions about the significant influence of the considered factors for immunity of the induction motors and the necessity to take them into account for correct determination of permissible levels of electro-magnetic interference.

***Ключевые слова**: качество электроэнергии, электромагнитная совместимость, электромагнитная помеха, асинхронный двигатель, помехоустойчивость*

***Key words**: power quality, electromagnetic compatibility, electromagnetic disturbance, induction motor, immunity*

В условиях рыночной экономики для собственников промышленных предприятий наиболее приоритетной задачей является максимальное сокращение расходов (при условии соблюдения всех нормативно-технических требований к выпускаемой продукции, обеспечения безопасных условий труда и т.д.), что может быть достигнуто путем выявления и ликвидации необоснованных затрат и оптимизации производственных процессов.

Важной составляющей расходов любого промышленного предприятия является оплата электрической энергии и обслуживание электрохозяйства, сюда же можно отнести затраты на реализацию мероприятий по энергосбережению, в том числе улучшению качества электрической энергии (КЭ).

В настоящее время не существует общепринятой методики разработки мероприятий по управлению КЭ и их экономического обоснования. Кроме того, существуют сомнения и в обоснованности предельных уровней показателей КЭ для определенных типов электроприемников. В работах [1, 2] отмечается, что в ряде случаев потребители могут нормально работать с низким уровнем КЭ, вплоть до превышения установленных в стан-

дарте норм в 1,5-2 раза. Это говорит о том, что ряд электроприемников обладает существенным запасом помехоустойчивости, обусловленным как его характеристиками, так и режимами работы. Для повышения экономического эффекта от реализации мероприятий по управлению КЭ необходим учет этих факторов, а соответственно и корректировка предельных уровней электромагнитных помех (ЭМП).

В качестве объекта исследования в данной работе выбраны асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АД) как наиболее распространенный вид промышленного электрооборудования.

Критерием работоспособности АД является обеспечение номинального момента на валу при допустимом температурном режиме обмоток. Дополнительным критерием может являться возможность пуска АД в работу.

Наличие ЭМП в питающем напряжении приводит к отклонениям рабочих характеристик АД: изменяется величина тока в обмотках, магнитный поток в сердечнике, скольжение и т.д. При определенном уровне ЭМП отклонения достигнут критических значений и нормальная работа АД будет нарушена.

В условиях эксплуатации АД стандартом ГОСТ IEC 60034-1-2014 нормируются следующие ЭМП: отклонение, несимметрия и несинусоидальность напряжения и отклонение частоты. Поскольку потребитель может влиять только на первые три ЭМП, то далее рассматриваются только они.

При снижении питающего напряжения уменьшается магнитный поток в сердечнике и рабочая точка механической характеристики двигателя смещается в сторону больших скольжений (при неизменном моменте сопротивления). Уменьшение магнитного потока приводит к снижению тока холостого хода и потерь в стали магнитопровода. При неизменном моменте сопротивления для поддержания прежней величины электромагнитного момента при пониженном магнитном потоке необходимо увеличение активной составляющей тока ротора. Ток статора электродвигателя складывается из тока холостого хода и тока ротора. Таким образом, одна из составляющих тока статора уменьшается, а вторая возрастает. Как правило, при больших нагрузках увеличение тока ротора более существенно и ток статора увеличивается. Повышение токов в обмотках приводит к увеличению потерь в «меди» и их недопустимому перегреву. Момент АД пропорционален квадрату напряжения. Соответственно по мере снижения питающего напряжения величина пускового момента может оказаться недостаточной для обеспечения запуска двигателя в работу. А когда величина критического момента АД становится меньше момента нагрузки, то электродвигатель теряет устойчивость и происходит его «опрокидывание».

Для положительных отклонений напряжения ход рассуждения аналогичен. Возрастает величина магнитного потока и тока холостого хода. При достаточной степени насыщения магнитной системы двигателя увеличение тока холостого хода оказывается более существенным, чем его снижение при отрицательных отклонениях напряжения. Активная составляющая тока ротора уменьшается, а ток статора, за счет значительного увеличения тока холостого хода, возрастает.

При несимметрии питающего напряжения в обмотках АД возникают токи обратной последовательности. Сопротивление обратной последовательности АД значительно меньше сопротивления прямой последовательности, в связи с чем даже небольшой уровень несимметрии напряжения приводит к появлению значительных токов обратной последовательности, приводящих к перегреву обмоток электродвигателя, а также создающих тормозящий момент.

При несинусоидальности питающего напряжения по обмоткам АД протекают токи высших гармоник. Их наличие приводит к возникновению дополнительных потерь в обмотках двигателя и магнитопроводе, а также к возникновению паразитных моментов.

На уровень помехоустойчивости АД оказывают влияние следующие факторы:

- коэффициент загрузки;
- температура охлаждающей среды;
- ненормируемые характеристики ЭМП;
- конструктивный температурный запас;
- ток холостого хода.

Рассмотрим каждый фактор более подробно.

1) Коэффициент загрузки. Величина коэффициента загрузки влияет на силу тока в обмотках электродвигателя, а соответственно и на величину мощности тепловыделений в его элементах. Малая загрузка АД создает температурный запас, который может покрывать дополнительные потери мощности, обусловленные наличием ЭМП. По данным [4], средний коэффициент загрузки электродвигателей составляет 0,3…0,6. При таких нагрузках перегрев АД вследствие наличия ЭМП маловероятен.

2) Температура охлаждающей среды. Для большинства АД в качестве охлаждающей среды выступает окружающий воздух, температура которого нормируется стандартом [3]. В зависимости от места размещения электродвигателя и специфики производства, температура окружающего воздуха может значительно колебаться в течение года. Если возможно точное определение максимальной температуры охлаждающей среды в течение эксплуатации электродвигателя, можно внести соответствующие поправки в величину допустимого превышения температуры АД. Если температура окружающей среды окажется ниже нор-

мируемой, то это обеспечит дополнительный температурный запас.

3) Ненормируемые характеристики ЭМП. Характеристики ЭМП, нормируемые стандартами [5, 6], не в полной мере характеризуют их воздействие на электрооборудование. Так, несимметрию принято оценивать коэффициентами несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности, определяемыми отношением напряжения обратной или нулевой последовательности к напряжению прямой последовательности. Однако сдвиг по фазе между симметричными составляющими напряжения не учитывается. В работе [7] показано, что при неизменном коэффициенте несимметрии напряжения и изменении угла сдвига фаз между симметричными составляющими, величина тока в наиболее загруженной фазе может существенно изменяться, что оказывает влияние и на тепловое состояние обмоток АД. Наибольшие токовые перегрузки в обмотках статора происходят при совпадении векторов симметричных составляющих одной фазы.

4) Конструктивный температурный запас. В номинальном режиме работы электродвигателя установившаяся температура его частей ниже допустимой на величину температурного запаса, обусловленного конструктивными параметрами АД.

Большинство АД имеют сервис-фактор, равный 1,1 и 1,15, т.е. они выдерживают длительную перегрузку на 10 % и 15 % (по мощности) соответственно. Для этого в них должен быть предусмотрен соответствующий температурный запас даже при номинальном коэффициенте загрузки.

Однако в ряде электродвигателей конструктивный температурный запас может превышать необходимый для обеспечения допустимой перегрузки. Так, согласно исследованию в [8], отношение допустимой по нагревостойкости изоляции температуры к реальной температуре обмоток АД серии АИС может достигать более 1,45.

5) Ток холостого хода. Для АД общепромышленного исполнения серии 4А величина относительного тока холостого хода (I_0 / I_1) может варьироваться в достаточно широких пределах от 0,16 до 0,83. Как было отмечено ранее, при отклонениях напряжения изменяются составляющие тока статора электродвигателя: ток ротора и ток холостого хода. При положительных отклонениях напряжения ток ротора убывает, а ток холостого хода возрастает, при отрицательных отклонениях напряжения – наоборот. На рис. 1 приведены зависимости тока статора от величины отклонений напряжения для трех АД с разными значениями тока холостого хода: 4А160S4, 4А100S4 и 4А71А4.

Как следует из рис. 1, при положительных отклонениях напряжения, чем выше относительный ток холостого хода электродвигателя, тем быстрее возрастает ток статора, а соответственно тем более опасен данный режим для АД. При отрицательных отклонениях напряжения ток статора возрастает в меньшей степени и даже может снижаться ниже номинального значения. Для АД с малым относительным током холостого хода наблюдается обратная ситуация.

На данных зависимостях (рис. 1) можно выделить области допустимых значений отклонений напряжения. Если полагать полное отсутствие температурного запаса, то недопустимый перегрев обмоток электродвигателя будет происходить при превышении номинального значения тока статора. Для представленных АД допустимые значения отклонений напряжения приведены в табл. 1.

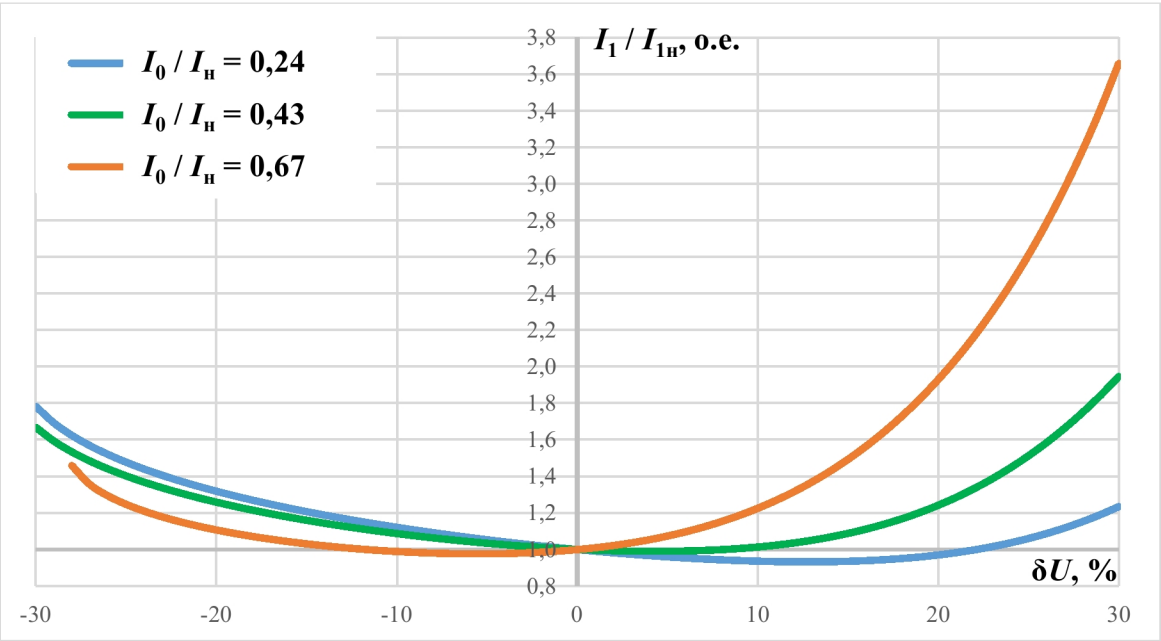

Рис. 1. Зависимость относительного тока статора АД от отклонений напряжения

Таблица 1. Допустимые отклонения напряжения для АД с различными токами холостого хода

№	Тип асинхронного двигателя	$I_0 / I_{1н}$, о.е.	Область допустимых отклонений напряжения, %
1	4A160S4	0,24	0…22
2	4A100S4	0,43	0 … 9
3	4A71A4	0,67	-12…0

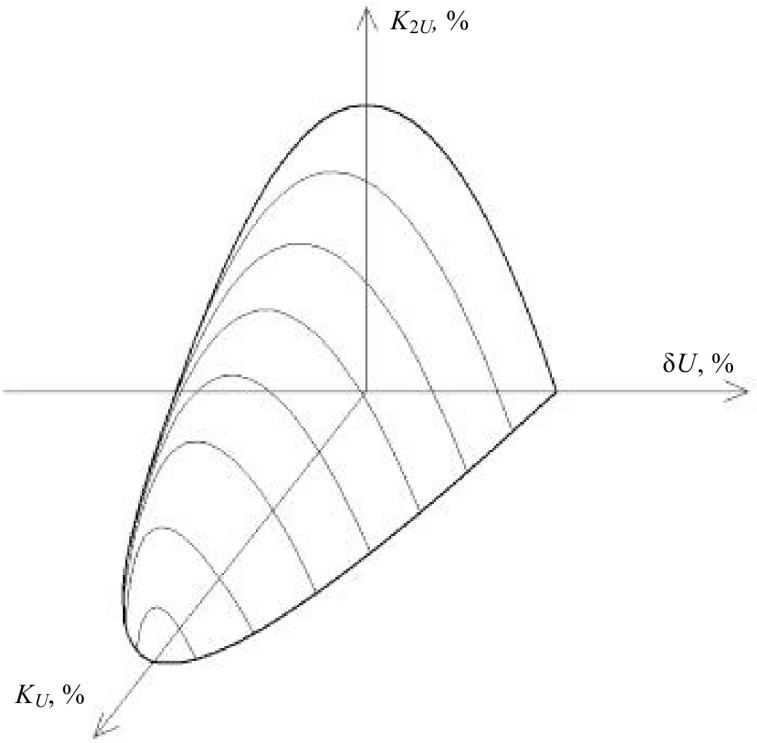

Рис. 2. Область допустимой работы электродвигателя

Полученные допустимые отклонения напряжения значительно различаются между электродвигателями, что говорит о том, что относительный ток холостого хода оказывает существенное влияния на помехоустойчивость АД.

При совместном рассмотрении всех трех ЭМП область допустимой работы электродвигателя будет представлять собой поверхность в системе координат δU-K_{2U}-K_U (рис. 2). Однако для большей наглядности рассмотрим двухмерный график (рис. 3).

На рис. 3 показан теоретический вид области допустимой работы АД, определяемой перегревом его обмоток. При уровнях несимметрии и отклонений напряжения, попадающих в область B, возможна нормальная работа АД, т.е. B – область допустимой работы электродвигателя. Оптимальный уровень напряжения $\delta U_{опт}$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения и зависит от тока холостого хода электродвигателя.

Совместное влияние отклонений напряжения и несимметрии приводит к более интенсивному нагреву АД. Чем выше уровень несимметрии, тем меньше допустимые отклонения напряжения и наоборот. Пунктирными линиями на рис. 3 обозначена область допустимой работы АД при раздельном учете ЭМП. Как следует из рис. 3, области допустимой работы электродвигателя при совместном (область B) и раздельном учете ЭМП различны. Области C характеризуют сокращение области допустимой работы АД при совместном действии нескольких ЭМП, а область A – расширение области допустимой работы при оптимальном уровне напряжения.

Влияние рассмотренных ранее факторов приводит к изменению области допустимой работы АД (рис. 4).

Сокращение и расширение области допустимой работы электродвигателя (красный сектор на рис. 4) может происходить, как было отмечено ранее, при изменении коэффициента загрузки или температуры охлаждающей среды, причем $T_1 > T_2 > T_3$; $K_{з1} > K_{з2} > K_{з3}$. Наличие конструктивного температурного запаса в АД также приводит к расширению области допустимой работы. Горизонтальное смещение областей (синий сектор на рис. 4) определяется величиной тока холостого хода электродвигателя. Область допустимой работы АД с малой величиной относительного тока

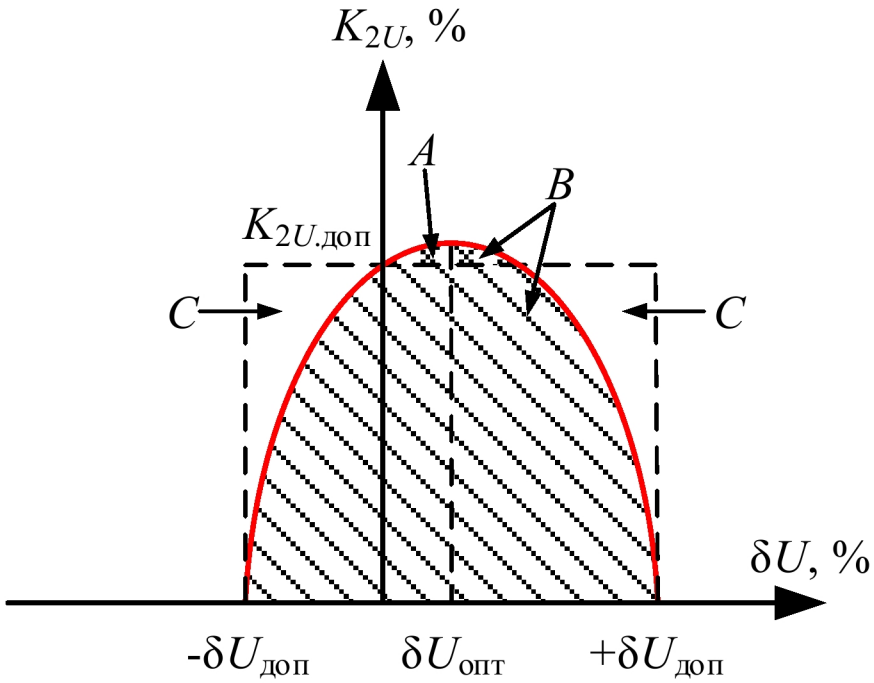

Рис. 3. Область допустимой работы электродвигателя в двухмерном изображении (без учета несинусоидальности)

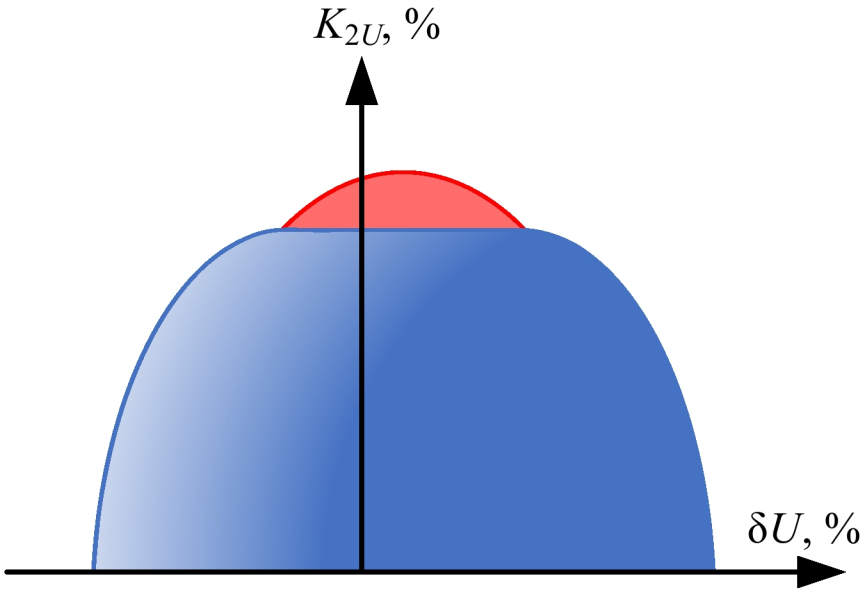

Рис. 4. Изменение области допустимой работы электродвигателя под влиянием различных факторов. Пунктирная линия – исходная область допустимой работы; красный сектор – диапазон расширения/сокращения области допустимой работы; синий сектор – диапазон горизонтального смещения области допустимой работы

холостого хода смещена в область положительных отклонений напряжения, а для АД с большей величиной тока холостого хода – в область отрицательных отклонений напряжения.

Действующими стандартами регламентируются достаточно жесткие требования к качеству питающего напряжения для АД, определяемые из наиболее тяжелых условий его работы. Однако на практике двигатели часто работают с недогрузкой, а также могут обладать большим конструктивным температурным запасом, что обуславливает значительный запас помехоустойчивости и соответственно малую чувствительность двигателя даже к высоким уровням ЭМП. В таких условиях опреде-

ляющим фактором при выборе предельных значений помех целесообразно считать экономический критерий, т.е. оптимальное соотношение между величиной ущерба от действия ЭМП (дополнительные потери мощности, сокращение срока службы и т.д.) и затратами на мероприятия по управлению КЭ. В таком случае определение оптимальных уровней показателей КЭ выполняется индивидуально для каждой электрической сети и определяется составом нагрузки, условиями ее эксплуатации, конфигурацией электрической сети и т.д.

Выводы.

1. Для корректного определения уровня помехоустойчивости АД необходимо выполнять совместный учет всех ЭМП.

2. На область допустимой работы АД значительное влияние оказывают рассмотренные факторы: коэффициент загрузки, температура охлаждающей среды, угол сдвига фаз между симметричными составляющими тока, конструктивный температурный запас и величина тока холостого хода. Учет данных факторов необходим для определения корректных уровней помехоустойчивости АД.

3. В условиях эксплуатации АД может иметь существенный запас помехоустойчивости, превышающий нормативный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагин, Г.Я. О необходимости приведения нормативных документов по электромагнитной совместимости к требованиям международных стандартов / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов // Промышленная энергетика, 2010. – №11. – С. 45-48.

2. Вагин, Г.Я. Электромагнитные помехи и электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий / Г.Я. Вагин // Промышленная энергетика, 1994. – №7. – С. 37-40.

3. ГОСТ IEC 60034-1-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 1. Номинальные значения параметров и эксплуатационные характеристики. – М.: Стандартинформ, 2015. – 62 с.

4. Дуюнов, Д.А. Асинхронный двигатель с совмещенными обмотками / Д.А. Дуюнов // Энергосовет, 2013. – №2. – С. 19-25.

5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

6. ГОСТ Р 51317.2.4-2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Стандартинформ, 2001. – 17 с.

7. Пинчук, О.Г. Моделирование токов и температур асинхронных двигателей при различных характеристиках несимметрии сети: методические подходы / Пинчук О.Г. // Материалы 2-й международной научно-технической конференции "Моделирование и компьютерная графика - 2007", Донецк, 10 - 12 октября 2007. – Донецк, 2007. – С. 347-353.

8. Моисеева, Е.Е. Разработка функциональных и тепловых моделей и алгоритмов выбора асинхронных двигателей серии АИС на основе экспериментальных данных: автореф. дис. … канд. техн. наук / Е.Е. Моисеева. – М., 1994. – 20 с.

REFERENCES

1. Vagin G.Ya. *O neobkhodimosti privedeniya normativnykh dokumentov po elektromagnitnoy sovmestimosti k trebovaniyam mezhdunarodnykh standartov* [On the necessity of adjusting the regulations on electromagnetic compatibility and the quality of electricity in accordance with the requirements of international standards]. *Promyshlennaya energetika energetika* [Industrial power engineering]. 2010. no. 11. pp. 45-48.

2. Vagin G.Ya. *Elektromagnitnye pomekhi i elektromagnitnaya sovmestimost' elektropriemnikov promyshlennykh predpriyatiy* [Electromagnetic disturbances and electromagnetic compatibility of power consumers of the industrial enterprises]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 1994. no. 7. pp. 37-40.

3. GOST IEC 60034-1-2014. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Nominal'nye znacheniya parametrov i ekspluatatsionnye kharakteristiki* [Rotating electrical machines. Part 1. Rating and performance]. Moscow: Standartinform, 2015. 62 p.

4. Duyunov D.A. *Asinkhronnyy dvigatel' s sovmeshchennymi obmotkami* [Induction motor with combined windings]. Energosovet. 2013. no. 2. pp. 19-25.

5. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektro-snabzheniya obshchego naznacheniya* [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow: Standartinform. 2014. 16 p.

6. GOST R 51317.2.4-2000. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnit-naya. Elektromagnitnaya obstanovka. Urovni elektromagnitnoy sovmestimosti dlya nizkochastotnykh konduktivnykh pomekh v sistemakh elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Electromagnetic compatibility of technical equipment. Electromagnetic environment. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances in industrial plants]. Moscow: Standartinform. 2001. 17 p.

7. Pinchuk O.G. *Modelirovanie tokov i temperatur asinkhronnykh dvigateley pri razlichnykh kharakteristikakh nesimmetrii seti: metodicheskie podkhody* [Simulation of currents and temperatures of induction motors under different unbalance characteristics of the network: methodological approaches]. *Materialy 2-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Modelirovanie i komp'yuternaya grafika - 2007". Donetsk, 10 - 12 oktyabrya 2007.* [Modeling and computer graphics-2007: proceedings of the 2th international scientific and practical conference (October, 10-12, 2007)]. Donetsk. 2007. pp. 347-353.

8. Moiseeva E.E. *Razrabotka funktsional'nykh i teplovykh modeley i algoritmov vybora asinkhronnykh dvigateley serii AIS na osnove eksperimental'nykh dannykh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of functional and thermal models and selection algorithms for induction motors of series AIS based on experimental data. Extended abstract of PhD dissertation]. Moscow. 1994. 20 p.

Поступление в редакцию 22.10.2016
Received 22 October 2016