

5. IEEE Standard for calculating the current temperature of bare overhead conductors. IEEE Std 738-2006. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. — 2006.

6. Пешков, И. Б. Основы кабельной техники / под ред. И. Б. Пешкова. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 432 с.

7. Вывод уравнения для коэффициента теплоотдачи вынужденной конвекцией в самонесущих изолированных проводах / А. А. Бубенчиков [и др.] // Энергоэффективность : Материалы Междунар. научн-практ. конф. — Омск. Изд-во ОмГТУ, 2010. — С. 20—24.

8. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. — 2009. — № 3(83). — С. 176—179.

9. Разработка комплекса программ сравнения методов расчета потерь электрической энергии в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом режимных и климатических факторов / В. Н. Горюнов [и др.] // Энергетика и энергосбе-

режение : межвуз. темат. сб. науч. тр. — Омск. : Изд-во ОмГТУ, 2011. — С. 201—210.

ПЕТРОВА Елена Владимировна, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

КИРИЧЕНКО Николай Васильевич, инженер кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ.

ПТИЦЫНА Елена Витальевна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Адрес для переписки: e-mail: stas_chicago@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.2011 г.

© Е. В. Петрова, А. А. Бубенчиков, Н. В. Кириченко,

Е. В. Птицына

УДК 621.316

**А. А. ПЛАНКОВ
Д. С. ОСИПОВ
А. В. БУБНОВ
С. Ю. ДОЛИНГЕР**

Омский государственный
технический университет

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ, ИСКАЖАЮЩИХ СИНУСОИДАЛЬНОСТЬ ФОРМЫ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА, НА ЗНАЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛА С АСИНХРОННОЙ НАГРУЗКОЙ

В данной статье дается оценка актуальности задачи исследования статической устойчивости узла с асинхронной нагрузкой. Рассмотрены наиболее распространенные критерии устойчивости, проведен их сравнительный анализ. Проведен анализ влияния электроприемников, искажающих синусоидальность формы кривой напряжения и тока, на значение критического напряжения при оценке устойчивости узла с асинхронной нагрузкой.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несинусоидальность тока, несинусоидальность напряжения, критерии устойчивости, асинхронная нагрузка, критическое напряжение.

Основную часть нагрузки электрических систем на современных объектах промышленности составляют асинхронные двигатели, которые оказывают непосредственное влияние на устойчивую работу всей системы. При аварийном режиме работа асинхронных двигателей может быть неустойчивой, то есть при снижении напряжения на выводах двигателей ниже допустимых значений может произойти

«опрокидывание» двигателей, следствием чего будет их остановка. Остановка двигателей приведет к нарушению технологического процесса, что вызовет значительный ущерб, особенно у потребителей I и II групп ответственности. Таким образом, задача анализа статической устойчивости узла с асинхронной нагрузкой представляется актуальной. Анализ статической устойчивости проводится в соответствии

с методическими указаниями, периодически выпускаемыми Министерством энергетики Российской Федерации [1].

При изучении режимов работы асинхронный двигатель представляется схемой замещения. Реальные физические процессы, происходящие в двигателях, хорошо отражаются Т-образной схемой замещения [2, 3].

Для удобства при изучении переходных процессов часто пользуются Г-образной схемой замещения двигателя, в которой намагничивающая цепь вынесена к месту приложения напряжения U_d [2]. При этом переход от Т-образной схемы замещения к Г-образной вносит дополнительную погрешность при расчетах полного сопротивления двигателя.

Увеличению погрешности расчетов при исследовании статической устойчивости узла с асинхронной нагрузкой также способствует дальнейшее упрощение Г-образной схемы замещения.

Учитывая тот факт, что от точности определения параметров исследуемой схемы замещения зависят многие показатели качества [4], далее при исследовании устойчивости узла с асинхронной нагрузкой будем рассматривать Т-образную схему замещения асинхронного двигателя.

В реальных установившихся режимах электрические системы имеют внешнее по отношению к двигателю реактивное сопротивление. Если не учитывать сопротивление системы, т.е. асинхронный двигатель получает питание от шин бесконечной мощности, то при определении значения критического напряжения может возникнуть значительная погрешность. Если учитывать внешнее по отношению к двигателю индуктивное сопротивление системы, условия нарушения устойчивости («опрокидывания») эквивалентного двигателя в исследуемой схеме существенно отличаются от случая, когда сопротивление системы не учитывается.

Это объясняется тем, что, во-первых, в такой схеме сопротивления системы и двигателя соизмеримы, и напряжение на выводах двигателя из-за падения напряжения на сопротивлении системы значительно ниже, чем эдс, и уменьшается с увеличением скольжения. Во-вторых, опрокидывание двигателя при учете внешнего по отношению к двигателю индуктивного сопротивления системы происходит при меньшем снижении напряжения относительно случая, когда сопротивление системы не учитывается, что объясняется гораздо меньшим значением критического скольжения эквивалентного двигателя, чем критическое скольжение двигателя, подключенного к шинам бесконечной мощности [5].

Следовательно, необходимо проанализировать результаты учета внешнего по отношению к двигателю индуктивного сопротивления системы при исследовании устойчивости узла с асинхронной нагрузкой.

В реальных случаях нагрузка в узле многообразна, при этом возможно наличие сразу нескольких асинхронных двигателей с различными параметрами. Поэтому при исследовании устойчивости узла рассматривается эквивалентный двигатель и нагрузка с усредненными параметрами. В таком случае критерий устойчивости записывается в следующем виде:

$$\frac{dm_d}{ds} > 0, \quad (1)$$

В данном случае предельным принимают скольжение $s_{кр}$. При этом возникает некоторая неточность

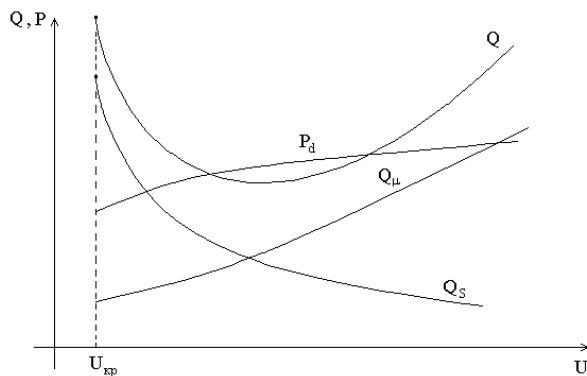


Рис. 1. Зависимости потребляемой нагрузкой активной и реактивной мощностей от напряжения на двигателе

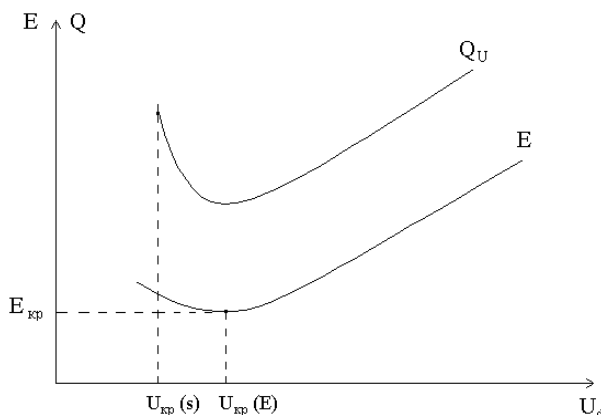


Рис. 2. Сравнение зависимостей $E = f(U_d)$ и $Q_U = f(U_d)$ при учете внешнего по отношению к двигателю индуктивного сопротивления системы при исследовании статической устойчивости узла с асинхронной нагрузкой

в расчетах, что способствует созданию дополнительного запаса надежности при оценке устойчивости работы узла с асинхронной нагрузкой.

Однако вычисление производной в формуле (1) часто представляет собой сложную задачу, что объясняется трудностями определения параметров эквивалентного двигателя.

Исследовать устойчивость узлов с асинхронной нагрузкой с меньшими трудозатратами возможно при использовании так называемых вторичных критериев, один из которых имеет вид:

$$\frac{dQ}{dU_d} = -\infty. \quad (2)$$

Потребляемая двигателем реактивная мощность Q состоит из двух слагаемых (рис. 1):

$$Q = Q_\mu + Q_s \quad (3)$$

где Q_μ — мощность, потребляемая ветвью намагничивания;

Q_s — мощность, потребляемая ветвью рассеяния.

Как отмечалось выше, на практике нагрузка узла многообразна, вследствие этого при исследовании устойчивости узла с асинхронной нагрузкой рекомендуется использовать так называемый критерий Жданова:

$$\frac{dE}{dU_d} = 0, \quad (4)$$

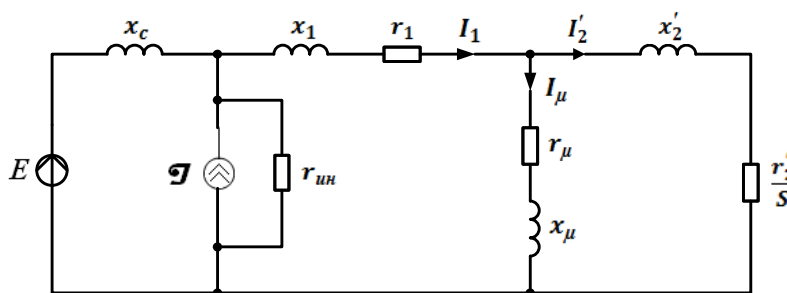


Рис. 3. T-образная схема замещения асинхронного двигателя с учетом внешнего индуктивного сопротивления системы и наличием источника высших гармоник

где эдс E , при известном напряжении на двигателе U_d , можно определить по формуле

$$E = \sqrt{(U_d + \frac{Q_U x_c}{U_d})^2 + (\frac{P_U x_c}{U_d})^2}. \quad (5)$$

При помощи критерия (4) определяется напряжение (критическое), которое предшествует лавине напряжения. Таким образом, критическое напряжение по критерию Жданова выше критического напряжения, определяемого по критерию (1) (рис. 2).

Для определения критического напряжения и запаса устойчивости нагрузки, согласно [1], необходимо искать возможные условия утяжеления исходного режима работы системы. Способы утяжеления режима могут быть различны:

- снижение ЭДС источников питания при неизменной схеме внешней сети;
- изменение схемы внешней сети (отключение некоторых элементов);
- изменение внешнего реактивного сопротивления при ЭДС, равных или отличающихся от ЭДС исходного режима;
- увеличение активной и реактивной нагрузки узла.

Если не учитывать внешнее по отношению к двигателю индуктивное сопротивление системы, то значения критического напряжения, полученные по всем вышеизложенным критериям, будут совпадать.

Если сопротивление системы и эквивалентного двигателя соизмеримы, то напряжение на выводах двигателя будет значительно ниже, чем эдс генератора E , вследствие его падения на сопротивлении системы. Далее будет рассматриваться именно этот случай.

Напряжение на двигателе зависит от соотношения внешнего по отношению к двигателю индуктивного сопротивления системы и суммарного индуктивного сопротивления рассеяния двигателя, а также от скольжения. Очевидно, что напряжение на двигателе снижается при увеличении сопротивления системы.

При определенном значении сопротивления системы (критическом) значение напряжения на двигателе является критическим. Незначительное увеличение сопротивления системы будет способствовать резкому падению напряжения на двигателе и его «опрокидыванию». Величина этого критического напряжения на двигателе определяется по одному из вышеизложенных критериев.

Рассмотрим критерий Жданова ($dQ_E/dE = -\infty$). В этом случае реактивную мощность, выдаваемую генератором, можно представить в виде двух составляющих:

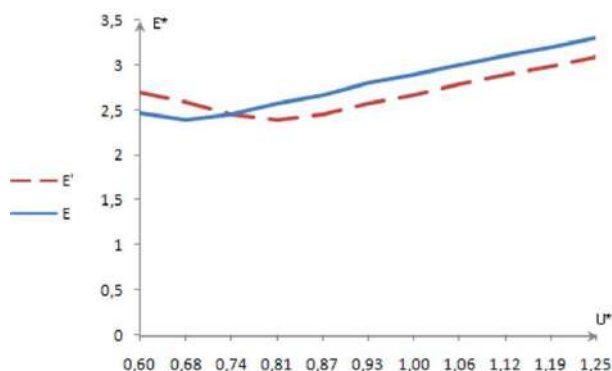


Рис. 4. Сравнение зависимостей $E = f(U_d)$ и $E' = f(U_d)$ без источника несинусоидальности в исследуемом узле нагрузки и при его учете

$$Q_E = Q_\mu + Q_{CS}, \quad (6)$$

где Q_μ — мощность, потребляемая ветвью намагничивания;

Q_{CS} — мощность, потребляемая ветвью рассеяния двигателя и сетью.

При снижении эдс потребляемая двигателем и сетью реактивная мощность сначала снижается, затем начинает возрастать, что будет способствовать дальнейшему увеличению падения напряжения на сопротивлении системы и снижению напряжения на двигателе. Следовательно, возникнет лавина напряжения, и произойдет «опрокидывание» двигателя.

Критическому значению эдс соответствует критическое значение напряжения на двигателе.

Для исследования устойчивости узла с асинхронной нагрузкой по критерию Жданова необходимо построить зависимость $E = f(U_d)$.

В настоящее время значительную долю электрических нагрузок составляют электроприемники, искажающие синусоидальность формы кривой напряжения и тока: системы частотно-регулируемого привода, газоразрядные лампы, источники бесперебойного питания. Такие электроприемники могут являться источниками высших гармоник и, возможно, оказывать влияние на статическую устойчивость узла с асинхронной нагрузкой (рис. 3).

Вентильные преобразователи обычно имеют систему автоматического регулирования постоянного тока путем фазового управления. При повышении напряжения в сети угол регулирования автоматически увеличивается, а при понижении напряжения уменьшается. Повышение напряжения на 1 % приводит к увеличению потребления реактивной мощности преобразователем примерно на 1–1,4 % (т.е. зависи-

мость потребления реактивной мощности преобразователем от напряжения является линейной), что приводит к ухудшению коэффициента мощности [6].

В то же время в фундаментальной теоретическим основам по исследованию устойчивости узлов нагрузки [2, 6] делается допущение, что нагрузка имеет синусоидальный характер, и влияние дополнительных источников высших гармоник в этих работах не приводится.

Таким образом, наличие в узле частотного преобразователя приводит к росту потребляемой реактивной мощности, что, в свою очередь, способствует росту критического напряжения в этом узле (рис. 4).

Следовательно, неучет высших гармоник тока может привести к опрокидыванию двигателя ранее ожидаемого времени. Учет высших гармонических составляющих тока позволит уточнить критическое напряжение и более качественно обеспечить устойчивость узла с асинхронной нагрузкой.

Для решения этих задач необходима информация об уровнях высших гармоник в сети, которая может быть получена путем измерений или расчетов. Достоинством измерений перед расчетами является более высокая точность результатов, однако эти результаты справедливы лишь на момент измерения и могут быть получены только для ограниченного числа узлов сети и только для текущих, но не для перспективных режимов. Следовательно, расчет высших гармоник имеет не меньшее значение, чем непосредственное измерение [7]. Поэтому уточнение критерия оценки устойчивости узла с асинхронной нагрузкой представляет собой актуальную и важную с практической точки зрения задачу.

Библиографический список

1. Методические указания по устойчивости энергосистем. — М. : Изд-во НЦЭНАС, 2004. — 16 с.

2. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока / А. И. Вольдек, В. В. Попов. — Л. : Изд-во Питер, 2008. — 350 с.

3. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников // Под ред. Л. Г. Мамиконянца. — 4-е изд., переработ. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.

4. Щербаков, А. Г. Методика идентификации параметров асинхронных двигателей / А. Г. Щербаков // Омский научный вестник. — 2011. — №1 (97). — С. 112–116.

5. Веников, В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. — М. : Высш. школа, 1985. — 536 с.

6. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 2010. — 375 с.

7. Осипов, Д. С. Учет нагрева токоведущих частей в расчетах потерь мощности и электроэнергии при несинусоидальных режимах систем : дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Осипов — Омск : ОмГТУ, 2005. — 152 с.

ПЛАНКОВ Александр Анатольевич, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

БУБНОВ Алексей Владимирович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий, заведующий секцией «Промышленная электроника».

ДОЛИНГЕР Станислав Юрьевич, ассистент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Адрес для переписки: e-mail: mail_tochka_ru@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 17.11.2011 г.

© А. А. Планков, Д. С. Осипов, А. В. Бубнов, С. Ю. Долингер

Книжная полка

621.1/К84

Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов по направлению «Агроинженерия» / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. — СПб. [и др.] : Лань, 2010. — 207 с. — ISBN 978-5-8114-1017-0.

Учебное пособие по теплотехнике состоит из трех разделов: основы технической термодинамики, основы теплопередачи, применение теплоты в сельском хозяйстве. В них изложены основные положения технической термодинамики, теории тепломассообмена, освещены вопросы топлива и его горения, котельных установок, отопления, вентиляции. Значительное внимание уделено сушке и хранению сельхозпродукции, охране окружающей среды и энергосбережению.

621.311/К21

Карасев, Д. Д. Системы тензорных уравнений электрических сетей и электромагнитных полей [Текст] / Д. Д. Карасев. — М. : Энергоатомиздат, 2010. — 331 с. — ISBN 978-5-283-03316-7.

В книге изложена методика формирования систем тензорных уравнений электрических сетей и электромагнитных полей. В первой части излагаются закономерности формирования систем тензорных уравнений электромагнитного поля. Во второй части рассматриваются закономерности формирования систем тензорных уравнений электромагнитного поля. В третьей части приводятся системы уравнений некоторых разделов теоретической механики. В приложениях излагается методика формирования системы уравнений воздушных линий электропередачи и силовых трансформаторов различных конструктивных исполнений, рассматривается методика минимизации потерь мощности в многослойных электрических сетях с большой степенью неоднородности.