

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Влияние частоты на устойчивость промышленных электротехнических систем

Ершов М. С., Егоров А. В., доктора техн. наук, Комков А. Н., магистр

Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, Москва

Исследовано влияние частоты питающей энергосистемы на показатели устойчивости электротехнических систем (ЭТС). Диапазон изменения частоты выбран в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54149–2010 для автономных энергосистем. Увеличение частоты приводит к ухудшению показателей устойчивости ЭТС. Установлен факт потери устойчивости ЭТС при скачкообразном, а также при непрерывном увеличении частоты.

Ключевые слова: частота напряжения питания, устойчивость, электротехническая система, показатели устойчивости.

С 1 января 2013 г. введен в действие ГОСТ Р 54149–2010, устанавливающий нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. В нем, в частности, предъявляются более мягкие, чем в ранее существовавшем стандарте, требования к качеству электроэнергии в изолированных системах электроснабжения. Так, в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками приняты следующие нормы допустимых отклонений частоты: ± 1 Гц в течение 95 % времени и ± 5 Гц в течение 100 % времени в одну неделю. Кроме того, введены пределы допустимого отклонения питающего напряжения ± 10 % [1, 2] нормального значения.

Потеря устойчивости ЭТС приводит к аварийному останову технологических линий, нарушению непрерывных технологических процессов, которые преобладают в нефтяной и газовой промышленности. На предприятиях данных отраслей восстановление нормального технологического режима может проходить весьма продолжительное время (вплоть до нескольких суток), что обуславливает существенный экономический и экологический ущерб.

В нефтяной и газовой отраслях из-за удаленности ряда производственных объектов (мощность которых может быть значительной и в некоторых случаях достигать десятков мегаватт) от центров питания часто возникают ситуации, когда их электроснабжение возможно и экономически целесообразно только от собственных генерирующих источ-

ников. Вследствие ограниченной мощности генерации снижается устойчивость данных ЭТС. При этом, как было установлено ранее [3], влияние изменения частоты на устойчивость ЭТС с асинхронной двигательной нагрузкой весьма существенно.

Достаточно полно состояние системы при нарушениях электроснабжения характеризуют показатели устойчивости: напряжение статической устойчивости $E_{c,y}$ или $U_{c,y}$ (минимально допустимое напряжение на входе ЭТС, при котором сохраняется устойчивая работа системы) и запас (время) динамической устойчивости τ_0 (максимально допустимая длительность исчезновения напряжения на входе ЭТС, после которого система возвращается в исходный рабочий режим) [3, 4]. На значение этих показателей влияют состояние и состав нагрузки самой ЭТС. Поэтому при компьютерном моделировании параметры ЭТС представляют по возможности подробно, а состав системы внешнего электроснабжения пренебрегают. В качестве модели источника внешнего электроснабжения используют эквивалентную ЭДС за реактивным сопротивлением (реактансом системы).

В связи с тем, что аналитически обосновать зависимость запаса динамической устойчивости от частоты не представляется возможным, для ее качественной оценки, а также для оценки напряжения статической устойчивости проведено моделирование на примере тестовой асинхронной ЭТС, упрощенная схема которой представлена на рис. 1. Номинальная потребляемая мощность

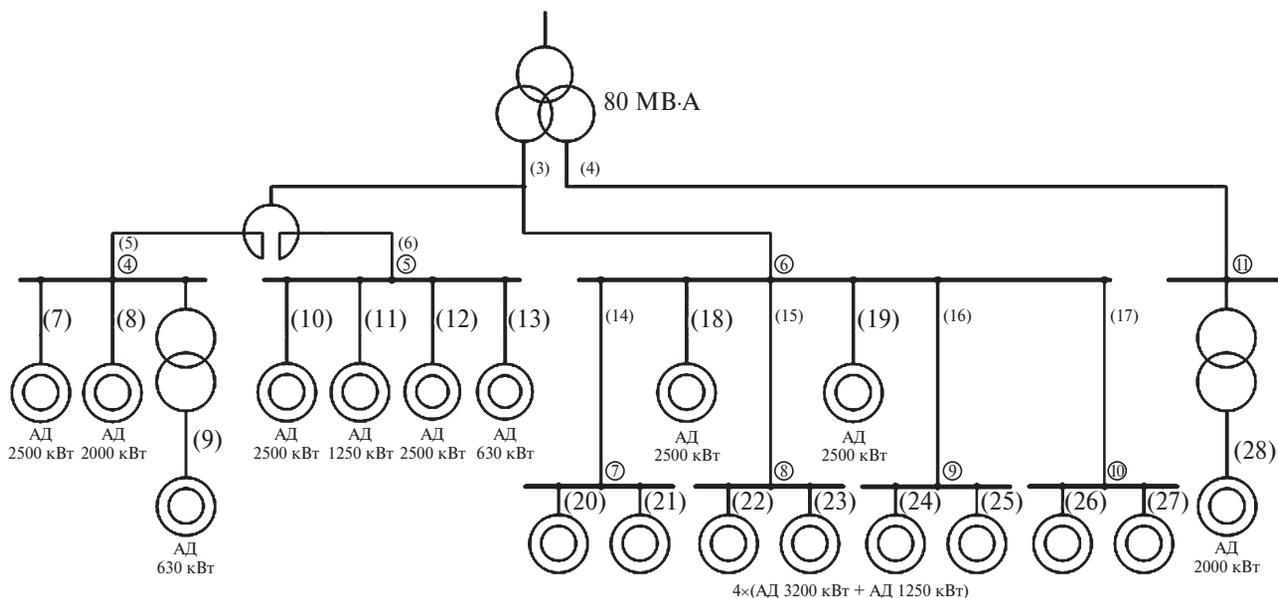


Рис. 1. Тестовая ЭТС с асинхронной двигательной нагрузкой

этой системы (примерно 37 МВт) превышает мощность большинства автономных ЭТС. Однако характер явлений, описанных далее, качественно такой же.

Номинальная эквивалентная ЭДС тестовой системы E принята равной 6600 В, эквивалентное реактивное сопротивление питающей энергосистемы — 0,06 Ом при частоте 50 Гц. В ходе компьютерного моделирования нарушений внешнего электроснабжения рабочую ЭДС изменяли в диапазоне от 6000 до 7200 В (что соответствует отклонениям примерно $\pm 10\%$), а частоту питающей энергосистемы — от 45 до 55 Гц. В указанных диапазонах, регламентированных стандартом, были определены показатели устойчивости ЭТС: напряжение статической устойчивости и запас динамической устойчивости.

Для асинхронных ЭТС приемлемой считается ЭДС статической устойчивости $E_{c,y} \leq 70\%$ номинального [3, 4]. Установлено, что с ростом частоты ЭДС статической устойчивости увеличивается прямо пропорционально от 4470 В (67,7% при $f=45$ Гц) до 5460 В (82,7% при $f=55$ Гц). График изменения $E_{c,y}$ представлен на рис. 2 (линия 5). При увеличении частоты выше 46,53 Гц значение $E_{c,y}$ становится неудовлетворительным.

Потеря статической устойчивости ЭТС происходит вследствие потери устойчивости наиболее нагруженного привода. Увеличение значения $E_{c,y}$ при росте частоты питающего напряжения связано с линейным характером изменения реактивных сопротивлений:

$$x = x_{\text{НОМ}} \frac{f}{f_{\text{НОМ}}},$$

где $x_{\text{НОМ}}$ — реактивное сопротивление элемента системы при номинальной частоте $f_{\text{НОМ}} = 50$ Гц; f — текущее значение частоты.

В [3] приведено аналитическое обоснование полученной линейной зависимости ЭДС статической устойчивости $E_{c,y}$ от сопротивления системы.

Под динамической понимается устойчивость системы к большим возмущениям ограниченной длительности. Приемлемым считается значение τ_0 не менее 500 мс [3, 4]. Результаты моделирования показали, что τ_0 изменяется в зависимости от частоты f нелинейно и разрывно, уменьшаясь с ее возрастанием. Из табл. 1, где приведены запасы динамической устойчивости τ_0 , мс, при полном исчезновении напряжения в зависимости от эквивалентной ЭДС E , В, и частоты f , Гц, питающей энергосистемы, следует, что с увеличением f даже на 1 Гц τ_0 существенно снижается. При частоте 45 Гц и значении эквивалентной ЭДС не менее 6300 В система становится абсолютно динамически устойчивой. Это означает, что возможен одновременный пуск всех электроприводов.

Как видно из рис. 2 (кривая 3), при номинальном значении ЭДС $E = 6600$ В и увеличении частоты с 50,7 до 50,71 Гц происходит скачкообразное уменьшение запаса динамической устойчивости с 366 мс при $f = 50,70$ Гц до 283 мс при $f = 50,71$ Гц. При дальнейшем росте частоты питающей энерго-

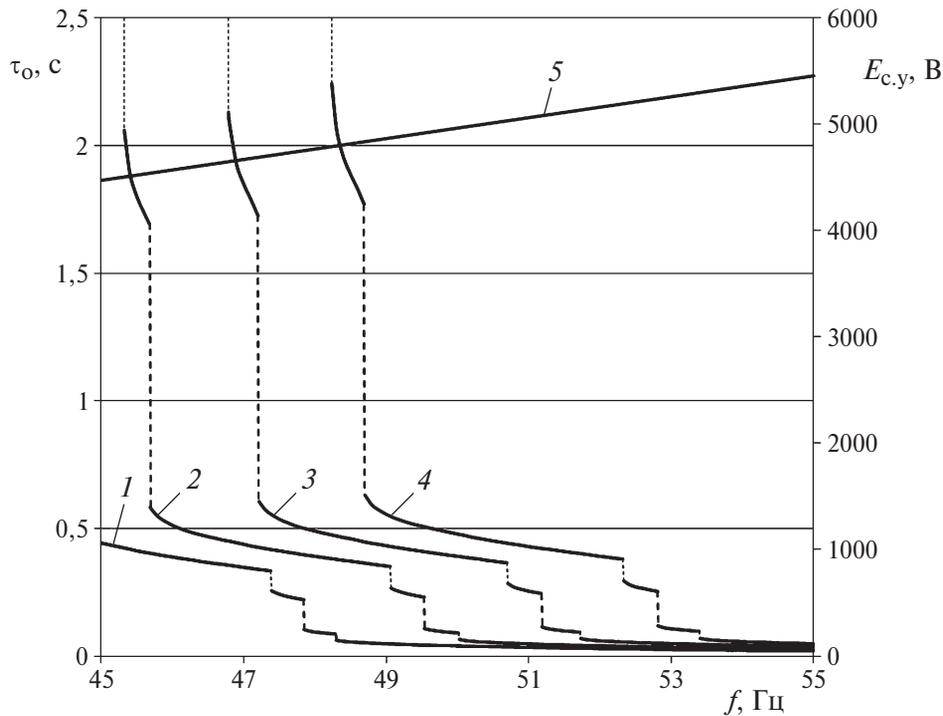


Рис. 2. Кривые 1 – 4 зависимости τ_0 от f (соответственно при $E = 6000, 6300, 6600, 6900$ В) и линия 5 – зависимость $E_{c.y.}$ от f

Таблица 1

| $f, \text{Гц}$ | Запас динамической устойчивости τ_0 , мс, при $E, \text{В}$, равной | | | | |
|----------------|---|----------|----------|----------|----------|
| | 6000 | 6300 | 6600 | 6900 | 7200 |
| 45 | 444 | ∞ | ∞ | ∞ | ∞ |
| 49 | 48 | 352 | 433 | 556 | ∞ |
| 50 | 40 | 90 | 392 | 479 | 1908 |
| 51 | 35 | 48 | 253 | 430 | 527 |
| 55 | 21 | 28 | 37 | 48 | 100 |

Примечание. Знак ∞ означает абсолютную динамическую устойчивость ЭТС.

системы до 55 Гц τ_0 уменьшается практически до нуля, что вместе со снижением статической устойчивости может привести к потере ЭТС устойчивости даже при возмущениях относительно небольшой интенсивности. На последнем участке кривой в интервале f от 51,73 до 55 Гц τ_0 плавно уменьшается с 68 до 37 мс. При этом невозможен пуск даже одного асинхронного привода мощностью более 630 кВт.

При снижении значения эквивалентной ЭДС график зависимости запаса динамической устойчивости смещается влево. В связи с этим точки разрыва этого графика могут

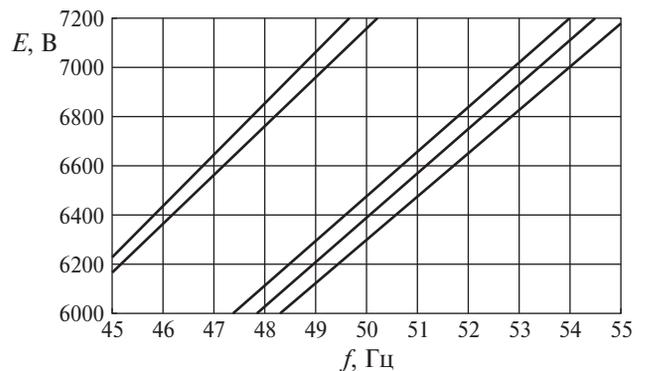


Рис. 3. Разбиение пространства (E, f) параметров питающей энергосистемы в соответствии с точками разрыва

попасть в диапазон $\pm 0,2$ Гц, установленный стандартом для систем, присоединенных к единой системе электроснабжения. В ряде случаев увеличение частоты даже на 0,01 Гц может привести к значительному снижению τ_0 . Например, при $E = 6300$ кВ и изменении f с 50,02 до 50,03 Гц происходит скачкообразное уменьшение τ_0 с 0,089 до 0,065 с.

Разрывность зависимости запаса динамической устойчивости от частоты обоснована в [3, 5]. На рис. 3 представлено разбиение пространства (E, f) параметров питающей энергосистемы в соответствии с точками разрыва кривых зависимостей запаса динамической устойчивости. Отметим, что для данной ЭТС на кривых зависимости τ_0 от f имеется

Таблица 2

| Интервалы зависимости $\tau_0(f)$ | Границы участка непрерывного изменения частоты при $E = 6600$ В | Электроприводы, не вышедшие на рабочий режим |
|-----------------------------------|---|--|
| 1 | 45,00 – 46,78 | – |
| 2 | 46,79 – 47,20 | 7, 10, 11, 12, 18, 19 – 27 |
| 3 | 47,21 – 50,70 | 7, 10, 12, 20, 22, 24, 26 |
| 4 | 50,71 – 51,18 | 7, 10, 12 |
| 5 | 51,19 – 51,72 | 10, 12 |
| 6 | 51,73 – 55,00 | 12 |

до пяти точек разрыва. Можно предположить, что это обусловлено пятью номинальными мощностями асинхронных двигателей, входящих в состав нагрузки. Однако при этом не учитывается различие параметров рабочего механизма (в частности, момента инерции) и коэффициента загрузки двигателя, а также его электрическая удаленность, хотя инерционные свойства из-за однозначной связи с ними времени выбега электропривода являются определяющими показателями, влияющими на динамическую устойчивость.

Для установления влияния состава нагрузки на возникновение точек разрыва кривой зависимости запаса динамической устойчивости от частоты с помощью компьютерного моделирования для каждого интервала были определены двигатели, которые после наименьшего критического возмущения при возвращении эквивалентной ЭДС на прежний уровень не выходят на рабочий режим. Под наименьшим критическим возмущением в данном случае понимается возмущение вдоль границы устойчивости в зоне неустойчивой работы. Приводы, не вышедшие на рабочий режим, указаны в табл. 2.

С ростом частоты питающей энергосистемы ЭТС становится чувствительной к незначительным возмущениям, поэтому нарушение работы даже одного привода может привести к потере устойчивости всей системы в целом. Следует отметить, что при увеличении длительности возмущения перечень асинхронных двигателей, не вышедших на рабочий режим, меняется. Так, для второго интервала при возмущении, вызывающем полный выбег приводов, на рабочий режим выходят только

три привода — 8, 9, 13, для шестого интервала — только два — 9, 13.

Анализ τ_0 для ЭТС, питающихся от синхронизированных систем электроснабжения, дает возможность в диапазоне $\pm 0,2$ Гц при разных уровнях напряжения выявить точки разрыва кривой запаса динамической устойчивости и электроприводы, влияющие на возникновение данного разрыва. Снижение коэффициента загрузки этой группы электроприводов позволяет сместить точку разрыва зависимости вправо. Несмотря на то, что данное смещение незначительно, например, для пятого разрыва при $E = 6300$ В (кривая 2 на рис. 2) при снижении загрузки электропривода 10 на 15 % (с 75 до 60 %) смещение составило всего 0,01 Гц. Учитывая, что в нормальном режиме работы отклонение частоты обычно равняется $\pm 0,02$ Гц, такое смещение точки разрыва все же позволяет повысить динамическую устойчивость.

Кроме вычислительных экспериментов по определению показателей устойчивости был проведен опыт, в котором моделировалось скачкообразное изменение частоты питающей энергосистемы. Такое изменение частоты происходит только в редких случаях, например, при переключении нагрузки на несинхронизированный источник. С учетом возможного различия частот источников, которое будет удовлетворять требованиям вновь вводимого стандарта, такая ситуация реальна.

В результате компьютерного моделирования установлено, что тестовая ЭТС теряет устойчивость при скачкообразном изменении частоты с номинальной (50 Гц) до $f_2 = 52,04$ Гц. Данный параметр был определен и для других значений начальных частот f_1 , значения которых приведены в табл. 3. Следует отметить, что с ростом значения начальной частоты критический скачок Δf уменьшается, а это в свою очередь приводит к увеличению вероятности потери устойчивости.

В качестве альтернативы скачкообразного изменения частоты рассмотрено продолжительное непрерывное изменение частоты на устойчивость ЭТС. Характер изменения выбран линейным в связи с тем, что функциональная зависимость его от времени неизвестна, поскольку до 2013 г. к обеспечению частоты системами автономного электроснабжения предъявлялись значительно более жесткие требования. Реализация линейной зависимости при моделировании наиболее проста. Установлено, что при скорости изменения частоты, не меньшей 4,35 Гц/с, и ли-

нейном увеличении частоты от 50 до 55 Гц ЭТС теряет устойчивость. При увеличении частоты от 45 до 55 Гц для потери системой устойчивости скорость изменения частоты должна быть не меньше 4,17 Гц/с. Отсюда следует, что в диапазоне, установленном ГОСТ Р 54149–2010, к потере ЭТС устойчивости может привести не только скачкообразное, но и непрерывное изменение частоты.

Выводы

1. Изменение частоты в пределах, установленных ГОСТ Р 54149–2010, может приводить не только к недоотпуску продукции, высокому уровню брака, значительному изменению потерь во вращающихся электрических машинах и трансформаторах, удорожанию электрооборудования [2, 6], но и к снижению в некоторых случаях показателей устойчивости ЭТС до неприемлемого уровня.

2. При росте значения частоты увеличивается напряжение статической устойчивости и одновременно уменьшается запас динамической устойчивости, т. е. резко сокращается зона устойчивой работы, которая при этом приближается к области естественных колебаний параметров источника внешнего электроснабжения, и уменьшается зона слабых возмущений.

3. С ростом частоты питающей энергосистемы увеличение напряжения статической устойчивости происходит непрерывно и линейно. Снижение запаса динамической устойчивости характеризуется наличием нескольких участков, на границах которых значение τ_0 изменяется скачкообразно. Отсутствие непрерывности связано с составом двигательной нагрузки, ее инерционными свойствами, удаленностью от источника питания, коэффициентом загрузки.

4. При сохранении номинального уровня напряжения к потере устойчивости ЭТС может приводить как скачкообразное изменение, так и непрерывный рост частоты в диапазоне, допустимом введенным стандартом для автономных систем электроснабжения. При снижении напряжения на входе ЭТС

Таблица 3

| Начальная частота f_1 , Гц | Значение скачка частоты Δf , Гц | Значение конечной частоты f_2 , Гц |
|------------------------------|---|--------------------------------------|
| 45 | 3,11 | 48,11 |
| 46 | 2,83 | 48,83 |
| 47 | 2,58 | 49,58 |
| 48 | 2,37 | 50,37 |
| 49 | 2,19 | 51,19 |
| 50 | 2,04 | 52,04 |
| 51 | 1,88 | 52,88 |
| 52 | 1,75 | 53,75 |
| 53 | 1,63 | 54,63 |
| 54 | 1,51 | 55,51 |
| 55 | 1,41 | 56,41 |

вместе с ростом частоты возрастает вероятность потери устойчивости.

Список литературы

- ГОСТ Р 54149–2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
- Ершов М. С., Егоров А. В., Комков А. Н. Новый стандарт качества электрической энергии и вопросы регулирования взаимоотношений ее поставщиков и потребителей. — Территория НЕФТЕГАЗ, 2012, № 6.
- Ершов М. С., Егоров А. В., Трифионов А. А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. — М.: Недра, 2010.
- Методика компьютерного моделирования электропотребления систем электроснабжения газовых комплексов. М., 2003.
- Ершов М. С., Егоров А. В., Яценко Д. Е. О влиянии параметров энергосистемы на устойчивость узлов электрической нагрузки. — Промышленная энергетика, 1997, № 5.
- Вагин Г. Я. Комментарий к новому стандарту на качество электрической энергии ГОСТ Р 54149–2010 и сопровождающим его стандартам. — Промышленная энергетика, 2013, № 1.

Комков.а@gubkin.ru