

3. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна: учебники и учеб. пособия для высш. учеб. заведений /

А.Я. Соколов, В.Ф. Журавлев, В.Н. Душин. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1984. – 445 с.



УДК 629.4.082.3:621.3.004.12

В.Б. Белый

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

**Ключевые слова:** системы сельского электроснабжения, технические средства, резонанс в электрических сетях, электромагнитная совместимость оборудования, устройства компенсации реактивной мощности.

### Введение

Нормальное функционирование многих объектов (производственных, коммунальных, бытовых), а также безаварийная работа отдельных электроприемников обеспечивается рядом систем, в том числе системами электроснабжения, управления и связи. Для этих систем особую значимость имеет проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) как способность одних электротехнических средств нормально функционировать в условиях внутренних и внешних электромагнитных воздействий, не создавая при этом недопустимых помех другим электротехническим средствам. Одновременно с этим система электроснабжения (СЭС) должна обеспечивать потребителей электроэнергией, качество которой соответствует требованиям действующих нормативов [1].

Одним из основных показателей качества электрической энергии является качество напряжения в СЭС. На него влияют много факторов, среди которых такое мало изученное явление, применительно к системам сельского электроснабжения, как резонанс токов (т.н. параллельный резонанс). Это опасное явление возникает при наличии в СЭС нелинейных электропотребителей (как бытовых, так и производственных) и одновременном использовании установок компенсации реактивной

мощности, подключенных к шинам низкого напряжения трансформатора.

**Причины возникновения резонанса.** Чтобы говорить о явлении резонанса предметно, необходимо рассмотреть причины его возникновения. Сделаем это на примере резонансных явлений, связанных с работой силовых трансформаторов и установок компенсации реактивной мощности (УКРМ). В общем представлении это есть не что иное, как хорошо известный из теории электротехники [2] резонансный контур (рис. 1). В этой схеме имеется цепь с двумя параллельными ветвями: одна – с активным сопротивлением и индуктивностью, моделирующая силовой трансформатор, а другая – с емкостью, моделирующая устройство компенсации реактивной мощности.

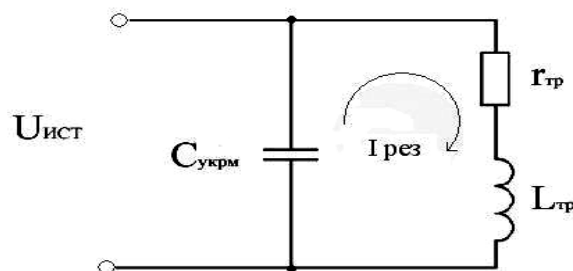


Рис. 1. Резонансный контур

В такой цепи резонанс наступает тогда, когда суммарное реактивное сопротивление  $x_{\Sigma} = x_L - x_C = 0$ , или  $x_L = x_C$ , т.е.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Из этого условия следует, что резонанс может возникнуть при изменении реак-

тивных параметров цепи – индуктивности или емкости. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Таким образом, индуктивность обмоток трансформатора, а также количество включенных конденсаторов УКРМ и определяют резонансную частоту рассматриваемой цепи.

Рассмотрим это более подробно на примере подстанции с трансформатором мощностью 400 кВА. К шинам 0,4 кВ подстанции подключена УКРМ типа КМ2А-0,38 мощностью 156 кВАр (рис. 2). Установка компенсации реактивной мощности имеет 6 ступеней регулирования по 26 кВАр каждая.

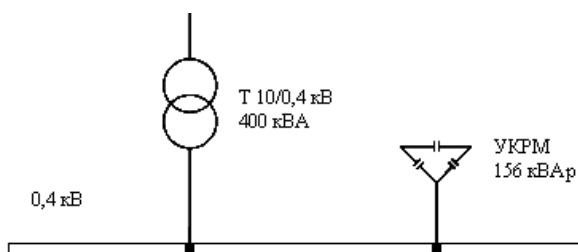


Рис. 2. Шины трансформаторной подстанции с УКРМ

Зная исходные данные, такие как емкость конденсаторов (число включенных в работу ступеней УКРМ) и параметры силового трансформатора, можно определить номер резонансной гармоники промышленной частоты, на которой возникает резонанс:

$$n = \sqrt{\frac{100 S_{TP}}{u_{K\%} Q_{УКРМ}}},$$

где  $S_{TP}$  – номинальная мощность трансформатора, кВА;

$u_{K\%}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %;

$Q_{УКРМ}$  – суммарная мощность включенных в работу ступеней УКРМ, кВАр.

Применительно к рассматриваемому примеру составлена таблица, в которой рассчитаны номера резонансных гармоник в зависимости от количества работающих ступеней УКРМ.

В результате при работе двух ступеней УКРМ условия резонанса возникают приблизительно на 11-й гармонике промышленной частоты, т.е. на частоте 550 Гц. Таким образом, при наличии в линии не-

линейных нагрузок, имеющих в спектральном составе тока 11-ю гармонику, на участке цепи «Трансформатор – УКРМ» будут возникать опасные резонансные явления.

Таблица

Номера резонансных гармоник в зависимости от количества работающих ступеней УКРМ

Количество ступеней УКРМ	Емкость ступеней УКРМ, мкФ	Номер резонансной гармоники
1	217,9	18,49
2	435,8	13,07
3	653,7	10,68
4	871,6	9,24
5	1089,51	8,27
6	1307,41	7,55

### Последствия резонанса

**Ухудшение качества питающего напряжения.** Резонанс, возникающий на шинах трансформатора, приводит к резкому увеличению тока и изменению его гармонического состава в резонансном контуре. Кроме того, при резонансе наблюдается ухудшение качества питающего напряжения на шинах низкого напряжения трансформатора. Это ухудшение выражается в искажении синусоидальности кривой напряжения вследствие увеличения коэффициентов  $n$ -ных гармонических составляющих. На рисунке 3 представлены осциллограммы и гармонический состав напряжений на шинах НН потребительской подстанции при выключенной (а) и включенной (б) установке компенсации реактивной мощности.

Замеры производились на одной из цеховых подстанций системы электроснабжения завода «Кучук-сульфат». Подстанция питает производственную нагрузку, в составе которой преобладают асинхронные двигатели, часть из которых имеет частотное регулирование скорости вращения. Кроме этого в составе заводской нагрузки имеется такой вид нелинейной нагрузки, как источники бесперебойного питания суммарной мощностью 70 кВА.

Из рисунка 3 следует, что при включенной УКРМ качество напряжения хуже – значение амплитуды 11-й гармоники увеличилось более чем в 2,5 раза. Коэффициент  $n$ -ной гармонической составляющей напряжения для этой гармоники превышает 5,5%, в то время нормально допустимое значение этого показателя составляет 3,5%, а предельно допустимое – 5,25% [1]. В результате этого на шинах

НН трансформатора и на всех отходящих фидерах также наблюдается плохое качество напряжения. Таким образом, все оборудование, питание которого осуществляется с шин этой подстанции, будет снабжаться недопустимым с точки зрения показателей качества напряжением.

**Влияние резонанса на условия работы силовых трансформаторов.** При возникновении резонанса токи, протекающие по обмоткам силовых трансформаторов, приводят к принципиальным изменениям условий работы последних. Номинальные условия работы трансформаторов, а также их конструктивное исполнение, как правило, выбираются для токов и напряжений частотой 50 Гц. При этом допустимая несинусоидальность протекающих по обмоткам токов принимается не более 5%. Как уже отмечалось выше, при работе двух ступеней УКРМ наблюдается резонанс токов по 11-й гармонике промышленной частоты на участке цепи «Трансформатор – УКРМ». Это является следствием работы ИБП, подключенного к этой секции шин трансформатора. Известно, что при протекании несинусоидальных токов по обмоткам трансформаторов, за счет явления поверхностного эффекта и эффекта близости резко возрастают в них тепловые потери, кроме этого возникают потери, связанные с магнитными потоками рассеяния. Все это приводит к значитель-

ному повышению температуры элементов трансформатора даже при токах, величина которых существенно ниже номинальных для трансформатора данного типа и мощности. Для оценки влияния резонанса на условия работы трансформаторов необходимо определить эквивалентную токовую нагрузку (по тепловому режиму) с учетом высших гармоник тока. Коэффициент эквивалентной токовой нагрузки трансформатора  $k_{ЭТН}$  определяется следующим образом [3]:

$$k_{ЭТН} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{40} I_i^2 i^2}{I_{НОМТР}^2}} \cdot 100\%,$$

где  $I_i$  – действующее значение  $i$ -той гармоники тока;

$i$  – номер гармоники;

$I_{НОМТР}$  – номинальный ток обмотки

НН трансформатора.

Проведенные измерения показали, что при резонансе токов эквивалентная токовая нагрузка трансформатора (с учетом гармонического состава тока) в отдельные продолжительные интервалы времени превышает 100%, т.е. трансформатор периодически оказывается перегруженным по тепловому режиму.

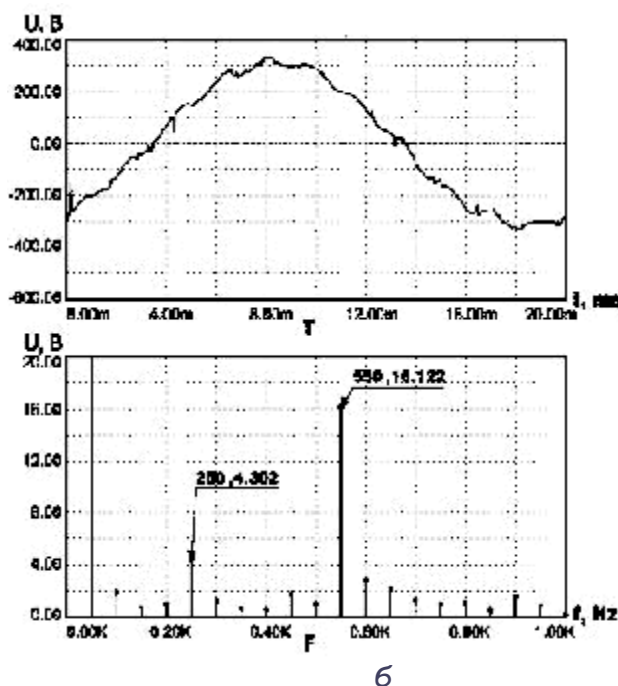
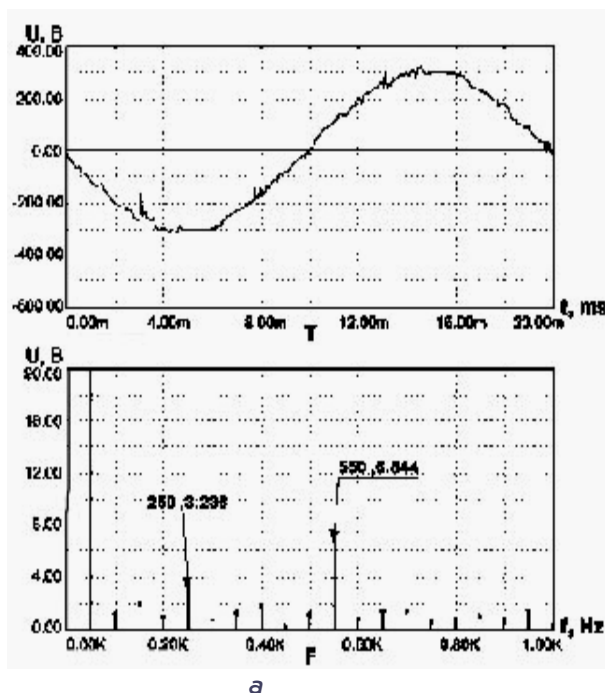


Рис. 3. Осциллограммы и гармонический состав напряжения: а – при выключенной; б – включенной УКРМ

**Резонанс и установки компенсации реактивной мощности.** Как это ни парадоксально, но и сами установки компенсации реактивной мощности «страдают» от резонанса. Резонансный ток, протекая по участку цепи «Трансформатор – УКРМ», является несинусоидальным и, так же как и в случае с трансформатором, негативно влияет на конденсаторные батареи, установленные в УКРМ, вызывая их дополнительный нагрев. Емкостное сопротивление конденсаторов с повышением частоты подводимого к ним напряжения уменьшается. Поэтому, если в напряжении присутствуют высшие гармонические составляющие, сопротивление конденсаторов на этих гармониках оказывается значительно ниже, чем на частоте 50 Гц. По причине этого даже небольшое увеличение несинусоидальности напряжения может вызывать значительные токи гармоник, протекающих через установку компенсации реактивной мощности. Следствием этого являются преждевременный выход из строя УКРМ, перегрев, вспучивание, а иногда и взрывы конденсаторных батарей.

#### Выводы

Исходя из вышесказанного можно сделать следующие выводы о влиянии резонанса на условия электромагнитной совместимости оборудования систем электроснабжения. Явление резонанса приводит:

1) к резкому снижению качества питающего напряжения на шинах трансформатора (по гармоническому составу) – к увеличению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициентов  $n$ -ной гармонической составляющей напряжения по отдельным резонансным гармоникам;

2) к сбоям в работе различного электронного оборудования, а также их преждевременному выходу из строя;

3) к резкому увеличению тока резонансной гармоники через трансформатор, что является причиной его тепловой перегрузки даже при протекании по обмоткам токов с действующими значениями, которые значительно (в 2-3 раза) меньше номинальных;

4) к преждевременному выходу из строя батарей статических конденсаторов установок компенсации реактивной мощности.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.

3. IEEE Std C57.110-1998 IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Carrents, 1998.

