

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИДЕНТИФИКАЦИИ РЕЗОНАНСНЫХ РЕЖИМОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И КОММУНАЛЬНО-БЫТОВОГО СЕКТОРА

Авторами произведен обзор литературных работ, посвященных выявлению потенциальных резонансных режимов, которые могут возникнуть в сетях промышленных предприятий и непроизводственной нагрузки. В некоторых случаях исследовательскими коллективами были представлены способы по недопущению выполнения резонансных условий. Рассмотрено возникновение и влияние резонансных перенапряжений на конструктивные элементы электрических машин и предложены технические решения по диагностике машин, а также представлены способы по повышению точности идентификации внутренних резонансных частот, вблизи которых будут возникать перенапряжения.

Ключевые слова: резонансный режим, резонансные перенапряжения, анализ и идентификация резонансных режимов.

Негативные последствия резонансных режимов для элементов систем электроснабжения. В работе был произведен обзор литературы, посвященной проблеме возникновения резонансных режимов при наличии в сети нелинейной нагрузки, которая является источником высших гармоник в электроэнергетических системах. На протяжении последних лет в Российской Федерации набирает популярность идея создания систем электроснабжения, которые способны производить самостоятельную диагностику, контроль за режимами работы электроустановок, а также при отклонении от параметров режима выявлять эти отклонения и самостоятельно (без участия человека) устранять их. Эта технология получила наименование «Умные сети» (от англ. «Smart Grid»). Технология создания «умных сетей» предполагает, что контроль за состоянием электрических сетей, анализ аварийных режимов и проведение оперативных переключений производится за счет большого количества электроники и автоматики. Однако наличие высших гармоник в системах электроснабжения и появление резонансных режимов препятствует работе систем, созданных по технологии «Smart Grid» по причине некорректной работы электронных устройств. По-

этому проблема возникновения резонансных режимов работы при наличии нелинейной нагрузки в системах электроснабжения заслуживает внимательного изучения и разработки методов по устранению их негативного влияния.

Резонансные режимы могут быть двух видов: параллельный резонанс (резонанс токов) и последовательный резонанс (резонанс напряжений).

Резонанс токов — это режим работы сети, содержащей индуктивные и емкостные составляющие, соединенные параллельно. При параллельном резонансе суммарная реактивная проводимость неразветвленного участка близка к нулю; напряжение и ток совпадают по фазе (ток в системе будет иметь активный характер, и в неразветвленном участке сети окажется значительно меньше, чем составляющие токов разветвленных участков).

При последовательном резонансе составляющие напряжений (на емкости и индуктивности) оказываются равными $U_C = U_L = X_C I = X_L I$, и в зависимости от тока и реактивных сопротивлений могут принимать большие значения, во много раз превышающие напряжение питающей сети. При этом напряжение на активном сопротивлении оказывается равным напряжению питающей сети, т.е. $U_R = U$.

Резонансные режимы в промышленных электротехнических установках нежелательные и опасные явления, так как они могут привести к аварии вследствие недопустимого нагрева отдельных элементов электрической сети, пробоем изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, изоляции кабелей и конденсаторов при перенапряжениях на отдельных участках. Следовательно, предлагаемый вниманию читателя обзор современных источников, посвященный проблемам возникновения резонансных режимов в системах электроснабжения, может оказаться полезным для разработки новых технических решений по их предупреждению и ликвидации.

Возникновение резонансных режимов при наличии нелинейной нагрузки в сети и регулируемых конденсаторных батарей. Появление резонанса в сетях непроизводственной нагрузки. Резонансные режимы возникают на частотах высших гармоник. В настоящее время актуальным является разработка методов идентификации потенциально возможных резонансных режимов, особенно при изменении степени компенсации реактивной мощности (путем переключения ступеней конденсаторной батареи) и изменяющимся характере нагрузок (подключение/отключение потребителей, т. е. при наличии нестационарного режима работы системы электроснабжения) в окрестности частот каких-либо ВГ сети [1, 2].

Авторами [1] отмечено, что наиболее широкое применение в сетях промышленных предприятий и непроизводственной нагрузки коммунально-бытового сектора получили конденсаторные батареи как наиболее простые, дешевые, имеющие наилучшие технико-экономические показатели. Однако при наличии в сети нелинейных электроприемников конденсаторные батареи подвержены негативному влиянию высших гармоник. Они создают дополнительные потери в различных элементах электрической сети вследствие нагрева банок конденсаторов при протекании токов высших гармоник, что приводит к уменьшению срока службы, а также в самых неблагоприятных условиях могут наблюдаться случаи пожаров и взрывов конденсаторных батарей. Исследовательским коллективом в [1] разработан алгоритм, который лег в основу программы, которая позволяет:

— вычислить частоту, на которой может возникнуть резонансный режим;

— определить ёмкостную составляющую тока резонансного режима, которая будет протекать через конденсаторную батарею при введении параметров линии электропередачи, нагрузок, асинхронного двигателя, трансформатора, конденсаторной батареи и источников высших гармоник.

Алгоритм, позволяющий производить расчет потенциальных резонансных частот в системах электроснабжения, имеющих в своем составе нелинейные нагрузки и конденсаторные батареи, также был разработан и другим авторским коллективом. В этом алгоритме, подробно описанном в [2], в качестве дополнительного параметра производится учет активной составляющей сопротивления нагрузок и конденсаторной батареи.

Проблема возникновения резонансных режимов имеет место практически на всех промышленных предприятиях, так как практически все конденсаторные батареи ступенчато-регулируемого исполнения. Кроме промышленных предприятий, подобная проблема приобретает все большую ак-

туальность в непроизводственной сфере, к которой относятся офисные потребители (постоянное разрастание различных торговых представительств, зданий официальных дилеров, сферы услуг, использующих огромное количество компьютеров и оргтехники в работе), нагрузка коммунально-бытового сектора (те же персональные компьютеры в каждом доме), а также повсеместная замена ламп накаливания на современные источники света, к которым относятся люминесцентные либо светодиодные лампы).

Проведившиеся обширные исследования [3, 4] позволили выявить влияние высших гармоник на питающие сети на примере светодиодных источников света и импульсных источников питания персональных компьютеров (примеры электроприемников взяты как наиболее распространённые в настоящее время в быту), которые привели к следующим выводам:

— с увеличением количества электроприемников происходит увеличение потребляемой ими мощности, что, в свою очередь, приводит к увеличению суммарного потребляемого тока и все большему искажению синусоидальной кривой питающего напряжения;

— чем больше подключённых нелинейных потребителей к сети, тем больше становится амплитуда высших гармоник, кратных трем;

— при увеличении количества нелинейных электроприемников, получающих питание по одной линии, проявляется эффект компенсации некоторых гармонических составляющих.

Исследование резонансных процессов в однопроводных линиях электропередачи. Мы привлекли, что в большинстве случаев упоминание о резонансных режимах происходит с негативной стороны. Однако к настоящему времени было проведено достаточное количество исследований, подтверждающих использование этого явления с положительной стороны в практических целях.

В [5] проведен анализ электромагнитных процессов в различных резонансных системах, в том числе однопроводной.

Однопроводная резонансная система позволяет передавать исключительно реактивную составляющую мощности по сравнению с другими системами передачи, которые выполняют передачу не только реактивной, но также и активной составляющей мощности. Главным условием передачи энергии в таких системах — наличие резонансного режима между передающим и приемным контурами. В резонансном колебательном контуре происходит накопление реактивной мощности в реактивных элементах сети, которыми являются катушка и конденсатор. Запасаемая в контуре реактивная составляющая мощности во много раз превышает потребляемую контурами из сети её активной составляющей.

По мнению автора работы, резонансные явления в электрических цепях представляют собой совокупность вынужденных колебаний энергии в реактивных пространственных элементах цепи, которыми являются катушка и конденсатор, а также колебаний эфира в пространстве, находящегося в возбужденном состоянии и заполняющего эти пространственные элементы. Кроме того, сделано предположение, что избыток электрической энергии, возникающий в резонансном режиме контура, — это энергия эфира, находящегося в состоянии возбуждения.

В [6] выполнен натуральный эксперимент однопроводной линии электропередачи, работающей в резонансном режиме, начальной мощностью 30 кВт. Экспериментальная установка включает в себя следующие элементы: однопроводная линия; передающий и приемный воздушные трансформаторы; преобразователь частоты; разделительные конденсаторы; выпрямитель, питающий нагрузку. В качестве нагрузки использовались асинхронный двигатель и лампы накаливания. Приемный и передающий трансформаторы установки настроены в резонанс на частоте 5,62 кГц. В процессе исследования было выполнено моделирование различных режимов однопроводной линии электропередачи: нагрузочного (нормальный рабочий режим); холостого хода и короткого замыкания.

В нагрузочном режиме наблюдаются минимальные потери (потери на электромагнитное излучение равны <math><0,5\%</math> от номинальной мощности) при передаче электрической энергии (плотность тока в линии составляет приблизительно 600 А/мм², что сопоставимо с высокотемпературными сверхпроводниками). В режиме холостого хода экспериментальная установка потребляла энергию, не превышающую 2 % от передаваемой мощности. В отличие от традиционных трансформаторов, для которых режим короткого замыкания является очень тяжелым, результаты исследований подобного режима для приемного трансформатора резонансной однопроводной системы показали, что для нее режим короткого замыкания допустим.

Таким образом, исследования [5, 6] показали, что использование явления резонанса для передачи достаточного большого количества энергии по однопроводной линии электропередачи с плотностью тока, соизмеримой с высокотемпературными сверхпроводниками, и с наименьшими потерями, делает применение таких линий достаточно перспективным. Кроме того, их стоимость намного меньше, чем изготовленных из высокотемпературных сверхпроводников. Существенный недостаток предлагаемого технического решения — необходимость наличия на входе и выходе статических преобразователей частоты. Но и этот недостаток можно устранить созданием на входе системы ударного возбуждения трансформатора тока (путем установки тиристорного ключа).

Анализ резонансных процессов при диагностике двигателей. Внутренние резонансные перенапряжения в обмотках силовых трансформаторов. Резонансные режимы, как было сказано ранее, могут широко использоваться на практике не только для передачи электрической энергии в однопроводных ЛЭП, но и в качестве инструмента, позволяющего ответить на вопрос об исправности/неисправности электродвигателей.

Авторами [7] произведен обзор основных видов диагностики электрических машин с их преимуществами и недостатками. На основании обзора был предложен метод высокочастотной диагностики, позволяющий выявить неисправность машины, основываясь на анализе вида резонансных кривых. Экспериментальная установка, описываемая в работе, состоит из следующих основных частей: высокочастотного генератора (ВЧ-генератора), согласующего и измерительного устройств, подключаемых к клеммной коробке двигателя. В эксперименте резонансные свойства электродвигателя наблюдались в диапазоне частот от 1,7 до 1,8 МГц. Кроме того, авторами выдвинуты следующие предположения:

— при анализе разных машин резонансные свойства будут схожими;

— при обрыве одной из фаз или коротком замыкании будет происходить сдвиг резонансных частот (при коротком замыкании резонансные частоты будут увеличиваться, а при обрыве одной из фаз возможно появление других резонансных частот и их сдвиг в область более низких значений);

— при изменении сопротивления изоляции обмоток машины следует ожидать изменение добротности резонансных кривых.

Анализу негативного влияния резонансных режимов на изоляцию силовых трансформаторов посвящены работы [8–10].

В [8] упоминается, что обмотки трансформаторов подвержены влиянию внутреннего резонанса по причине возникновения перенапряжений на внутренней изоляции. В зоне повышенного риска выхода из строя — силовые трансформаторы, работающие в режиме, близком к холостому ходу (или слабонагруженные). Авторами работы отмечается, что «вследствие резонансных явлений большие электрические воздействия имеют место как на продольной изоляции обмоток (в первую очередь во входной зоне), так и на главной изоляции (на некотором удалении от входной зоны обмотки)». Иными словами, в первую очередь именно эти конструктивные элементы силовых трансформаторов подвержены негативному воздействию резонансных перенапряжений. Кроме того, существенно усугубляет ситуацию кумулятивный эффект от неоднократного воздействия резонансных повреждений на твердую изоляцию, постепенно приводящую к ее разрушению при номинальном напряжении.

Резонансные частоты обмоток силовых питающих трансформаторов электрических сетей составляют приблизительно десятки кГц. Подобные высокочастотные колебания напряжения создаются отражающимися колебаниями из-за каких-либо коммутаций, которые могут возникнуть в питающих кабельных или воздушных линиях. По этой причине авторами приводятся схемы, в которых существует потенциальный риск выхода из строя питающего трансформатора, коммутируемого вместе с линией электропередачи со стороны ее удаленного конца:

— «короткое замыкание на землю одной из фаз в начале линии (включая сюда питающие линии электропередачи)»;

— подключение системы питающая линия — силовой трансформатор к шинам подстанции, от которых получают питание огромное количество нагрузок, связанных с шинами подстанций огромным количеством линий с малым значением волнового сопротивления;

— подключение системы питающая линия — трансформатор к шинам подстанции при условии, что к ним уже подключена линия (линии) с аналогичными параметрами и длиной.

Для недопущения возможности возникновения резонансных перенапряжений предлагаются различные мероприятия:

— необходимо исключить использование главных схем, которые были рассмотрены ранее;

— если по каким-либо причинам не представляется возможным исключить использование подобных схем, то следует использовать выключатели вместе с предвключаемыми резисторами;

— в некоторых случаях имеет смысл применить раздельное включение силового трансформатора

и питающей линии при их последовательном подключении;

— производство отстройки собственной частоты колебаний блока «питающая линия — силовой трансформатор» от потенциально возможных резонансных частот первичной обмотки силового трансформатора;

— производить учет возможных резонансных перенапряжений силовых трансформаторов на стадии его проектирования и разработки.

Авторы [9] произвели исследование резонансных процессов, возникающих в обмотках трансформаторов при взаимодействии трансформатора с сетью питания. Исследовательским коллективом были выявлены условия, при которых появятся резонансные перенапряжения; кроме того, были определены воздействия резонансных перенапряжений на различные виды изоляции трансформатора при использовании двух программ: ТТ и ЕМТLab.

В результате проведенных исследований авторы приходят к следующим выводам:

— при появлении в системе перенапряжений, имеющих высокие частоты, в обмотках силового трансформатора будут происходить внутрикатушечные колебания резонансной частоты, которые приведут к повышенному уровню напряжения на входе обмоток (на масляных каналах);

— при появлении внутрикатушечных резонансных колебаний напряжения на канале можно определить при наличии программы, которая способна выполнить повитковое представление обмотки силового трансформатора при построении его схемы замещения;

— рассчитать резонансную частоту внутрикатушечных колебаний силового трансформатора с помощью быстрого преобразования Фурье, применяя его к сигналу напряжения на каналах трансформатора;

— при проектировании объектов электроэнергетики для исключения возможности появления резонансных перенапряжений авторами предлагается метод, позволяющий произвести быстрый расчёт резонансной частоты колебаний системы: «питающей кабель — силовой трансформатор». В основе метода лежит представление силового трансформатора в виде входной емкости. Предлагаемый авторами метод получил экспериментальную проверку, показывающую качественное совпадение результатов физического эксперимента с данными имитационного моделирования.

На основании сделанных выводов можно утверждать, что при соблюдении всех условий риск возникновения резонансных процессов снизится, также возникновение резонансных режимов можно исключить при помощи испытаний трансформаторов.

В [10] сообщается, что определить «кратности резонансных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов» экспериментально можно при заводских испытаниях трансформатора при подаче пониженного незагущающего напряжения на его первичную обмотку и производить замеры уровней напряжений на промежуточных точках обмотки. Производить физические замеры предельных уровней перенапряжений необходимо с использованием анализа частот реакции обмоток, кроме того, из измерительного тракта следует исключить измерительные кабели и согласующее сопротивление, так как это может привести к существенным погрешностям при определении резонансных частот

и кратностей перенапряжения. При проведении измерений необходимо обеспечить наименьшую емкостную составляющую измерительного тракта при подключении к промежуточным точкам обмоток.

Автором предлагается использовать вместо штатных кабелей и согласующих сопротивлений высокочастотные измерительные щупы, либо производить подключение измерительных приборов короткими измерительными проводами с применением промежуточного делителя напряжения, то есть модифицировать измерительный тракт, позволяющий проводить испытания по определению предельного уровня резонансных перенапряжений.

Феррорезонанс и возможные способы его подавления. В электрических сетях также возможно возникновение нелинейных резонансных явлений, а именно появление феррорезонанса, который может появиться при насыщении магнитных систем. В [11] приведена обширная классификация методов подавления феррорезонанса, а также рассмотрены достоинства и недостатки каждого из них. Несмотря на существующие технические решения, подчеркивается актуальность разработки новых способов идентификации и подавления этого явления. Предлагаемый авторский метод позволяет анализировать фазовые характеристики режима работы сети и на основе их анализа производить выбор ступени многоступенчатого резистора, а также его подключения к нейтрали сети при помощи специального блока управления.

Предотвращение резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах работы систем электроснабжения, содержащих управляемые шунтирующие реакторы. Резонансные явления также могут возникать и при неполнофазных режимах работы систем электроснабжения при наличии управляемых шунтирующих реакторов в сетях сверхвысокого напряжения. В [12] отмечается, что при использовании реакторов в системообразующих электрических сетях в неполнофазных режимах работы таких сетей при полной степени компенсации емкостных токов возможно возникновение резонансных перенапряжений (иными словами, возможно выполнение условий резонанса напряжений). Особенно часто встречающаяся ситуация — возникновение резонансных перенапряжений при срабатывании однократного автоматического повторного включения линии (именно в этой ситуации в большинстве случаев и возникает неполнофазный режим). По вышеназванным причинам, по мнению авторов, следует не допускать выполнения условий последовательного резонанса, чтобы исключить выход из строя электроэнергетического оборудования.

Предлагаемый авторами работы метод, предотвращающий режим резонанса в режиме полной компенсации емкостного тока, основан на переключениях между режимами работы управляемого шунтирующего реактора. Также исследовательским коллективом было выявлено, что существует вероятность возникновения резонанса напряжений при отключении одной из фаз сети после гашения дуги при подключении управляемого шунтирующего реактора к системообразующим сетям с линиями электропередачи, имеющими длины от 175 до 190 км. Для того, чтобы исключить возможность возникновения выполнения резонансных условий, в этом случае авторами предлагается перевести управляемый шунтирующий реактор в режим холостого хода (второй случай перевода на холостой ход —

на линиях длиной от 370 до 395 км начиная с момента погасания дуги и до срабатывания устройства автоматического повторного включения однократного действия). Все выводы авторов подтверждаются результатами проведенного имитационного моделирования.

Заключение. Авторами настоящей работы был выполнен обзор различных источников, посвященный анализу возникновения, идентификации и разработки технических решений по недопущению и предотвращению появления в СЭС резонансных режимов, которые могут привести к различным негативным последствиям для элементов сети. В некоторых случаях было использовано это явление для передачи электрической энергии с минимальными потерями. Кроме того, был произведен обзор источников, посвященных феррорезонансу и возникновению резонансных перенапряжений при неполнофазных режимах работы в сетях, содержащих управляемые шунтирующие реакторы.

Библиографический список

1. Михеев Г. М., Атаманов М. Н. Алгоритм расчета тока высших гармоник в системе электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2018. № 3. С. 40–45.
2. Коваленко Д. В., Файфер Л. А., Киселёв Б. Ю. и [др.] Моделирование резонанса токов на высших гармониках при нестационарном режиме работы системы электроснабжения // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 64–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-64-69.
3. Анчарова Т. В., Бодрухина С. С., Цырук С. А. [и др.]. Оценка влияния эмиссии высших гармонических составляющих напряжения и тока от бытовых электроприемников на питающую сеть // Промышленная энергетика. 2012. № 9. С. 36–42.
4. Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов С. П. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 60–64. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-55-59.
5. Алиев И. И. О природе электрического резонанса // Электротехника. 2018. № 6. С. 71–74.
6. Алиев И. И. Экспериментальное исследование резонансной однопроводной системы передачи электроэнергии // Электротехника. 2016. № 10. С. 27–30.
7. Мирошниченко М. С., Дегтярев А. Н. Экспериментальное исследование резонансных свойств электродвигателя с фазным ротором на высоких частотах // Электричество. 2015. № 2. С. 64–67.
8. Ларин В. С., Жуйков А. В., Матвеев Д. А. Подход к анализу резонансных явлений и перенапряжений, возникающих

при взаимодействии силового трансформатора с электрической сетью // Энергетик. 2013. № 12. С. 21–25.

9. Ларин В. С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 1. Условия возникновения и защитные мероприятия // Электричество. 2015. № 11. С. 33–40.
10. Ларин В. С. Резонансные перенапряжения в обмотках трансформаторов. Ч. 3. Измерение напряжения в обмотках на резонансных частотах // Электричество. 2016. № 1. С. 20–24.
11. Рыжкова Е. Н., Цырук С. А., Вергара В. Л. О возможном способе подавления феррорезонанса // Промышленная энергетика. 2015. № 12. С. 23–29.
12. Матинян А. М., Пешков М. В., Карпов В. Н. [и др.]. Особенности УШРТ, обеспечивающие предотвращение резонанса напряжений в цикле ОАПВ линии // Электрические станции. 2016. № 11. С. 36–40.

КОВАЛЕНКО Дмитрий Валерьевич, ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

SPIN-код: 7587-8782

AuthorID (РИНЦ): 901108

ORCID: 0000-0003-4822-4145

AuthorID (SCOPUS): 57193410109

ResearcherID: R-7414-2017

ПУГАЧЕВА Екатерина Анатольевна, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 4918-6560

AuthorID (РИНЦ): 944833

РОГОЗИНА Дарья Анатольевна, магистрант гр. ЭЭМ-172 факультета элитного образования и магистратуры.

SPIN-код: 6900-4022

AuthorID (РИНЦ): 963248

ФРИДРИХ Александра Евгеньевна, магистрант гр. ЭЭМ-182 факультета элитного образования и магистратуры.

Адрес для переписки: Dmitrii_Kovalenko92@mail.ru

Для цитирования

Коваленко Д. В., Пугачева Е. А., Рогозина Д. А., Фридрих А. Е. Обзор современных исследований по идентификации резонансных режимов, возникающих в элементах электрических сетей промышленных предприятий и коммунально-бытового сектора // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 103–107. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-103-107.

Статья поступила в редакцию 31.10.2018 г.

© Д. В. Коваленко, Е. А. Пугачева, Д. А. Рогозина, А. Е. Фридрих