

Н.С. МИНИГАРЕЕВ, студент гр. ЭРб-241 (КузГТУ)
Научный руководитель Т.М. ЧЕРНИКОВА, д.т.н., профессор (КузГТУ)
г. Кемерово

РЕЗОНАНС В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Явление резонанса в электрических цепях традиционно рассматривается в контексте последовательных и параллельных RLC-контуров [1]. Однако современные практические применения этого явления требуют более глубокого анализа его специфических проявлений в реальных условиях. В данной работе исследуются особенности резонансных режимов в цепях с распределенными параметрами и их практическая значимость в современных энергетических системах.

Классическая теория резонанса предполагает сосредоточенные параметры элементов, однако в реальных энергетических системах на высоких частотах проявляются эффекты распределенных параметров. Волновые процессы в линиях электропередачи создают условия для формирования стоячих волн, где резонанс наступает при совпадении частоты внешнего воздействия с собственной частотой системы [2]. Особенностью таких резонансов является их пространственная локализация – максимумы напряжения и тока устанавливаются в определенных точках линии, создавая неравномерное распределение электромагнитного поля. Это явление особенно важно учитывать при проектировании длинных линий электропередачи и кабельных сетей высокого напряжения. В таблице 1 приводятся распределения напряжения вдоль ЛЭП при резонансных режимах (λ – длина волны).

Например, при отключении ненагруженного трансформатора или включении конденсаторной батареи могут возникать кратковременные резонансные перенапряжения с частотой от 200 до 2000 Гц. Эти процессы характеризуются быстрым затуханием амплитуды, но их пиковая величина может достигать 3-4 кратных значений от номинального напряжения, что создает серьезную угрозу для изоляции оборудования. Анализ таких переходных резонансов требует учета не только распределенных параметров линии, но и нелинейных характеристик электрооборудования, в частности, насыщения магнитопроводов трансформаторов и нелинейности вольт-кулонных характеристик конденсаторов[3].

Резонанс в системах с несинусоидальными формами тока и напряжения. Современная энергетика характеризуется значительными искажениями формы кривых тока и напряжения, обусловленными работой силовых

преобразователей, частотно-регулируемых приводов и других нелинейных нагрузок. В этих условиях резонанс может возникать не только на основной частоте 50 Гц, но и на кратных частотах – 250 Гц, 350 Гц и выше. Особую опасность представляет параллельный резонанс между емкостью конденсаторных батарей и индуктивностью сети, который приводит к многократному усилению высших частотных составляющих. Коэффициент усиления может достигать 5-10 раз (таблица 2), что вызывает перегрев оборудования и нарушения работы системы релейной защиты. Данное явление требует специальных мер защиты, как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации электроустановок [5].

Таблица 1

**Характер распределения напряжения вдоль ЛЭП
при резонансных режимах**

Тип резонанса	Длина линии	Распределение напряжения	Особенности
Резонанс на 1/4 волны	$l = \lambda/4$	Максимум на конце линии ($x=l$), минимум в начале ($x=0$)	Напряжение в конце линии может многократно превышать входное. Наиболее опасный режим для изоляции конечной подстанции
Резонанс на 1/2 волны	$l = \lambda/2$	Максимумы на концах и в середине линии. Минимумы на расстоянии $\lambda/4$ от концов	Опасность для изоляции как начальной, так и конечной подстанций
Резонанс на частоте, не кратной основной	$l \neq n \cdot \lambda/2$	Неравномерное распределение с одним ярко выраженным максимумом в точке, где амплитуда стоячей волны наибольшая	Локализация перенапряжений в конкретной точке линии, что сложно прогнозировать

Кроме отрицательно влияния, резонансы в электрических сетях имеют практическое значение. В современных условиях резонансные явления находят применение в системах компенсации реактивной мощности нового поколения. Активные фильтры используют принцип антирезонанса для подавления нежелательных частотных составляющих. Интеллектуальные системы мониторинга энергосетей постоянно отслеживают импеданс сети для предотвращения случайных резонансных режимов [6]. В устройствах плавного пуска мощных электродвигателей резонансные LC-цепи используются для ограничения пусковых токов, что позволяет снизить

электродинамические нагрузки на оборудование. Эти технические решения находят широкое применение в промышленных электросетях и системах электроснабжения крупных объектов.

Таблица 2
Характерные резонансные частоты в распределительных сетях 6-10 кВ

Тип оборудования	Диапазон резонансных частот, Гц	Коэффициент усиления
Кабельные линии	150-850	3-8
Воздушные линии	250-1250	2-6
Силовые трансформаторы	300-1000	4-10

Особого внимания заслуживает проблема резонанса в микро сетях с распределенной генерацией, где наличие инверторных источников питания создает условия для возникновения высокочастотных резонансов. Стабильность таких систем обеспечивается применением адаптивных систем демпфирования, которые изменяют свои параметры в зависимости от режима работы сети. Это направление представляет особый интерес для развития интеллектуальных энергосистем.

В случае опасного влияния резонансных режимов для современных энергосистем разработаны комплексные подходы к предотвращению резонансных явлений. Активные методы включают использование силовых электронных преобразователей с широтно-импульсной модуляцией, которые способны генерировать компенсирующие составляющие. Пассивные методы основаны на установке демпфирующих сопротивлений и фильтровых устройств, настроенных на критические частоты. Перспективным направлением является создание цифровых двойников энергосистем, позволяющих моделировать резонансные режимы в реальном времени и прогнозировать их развитие. Эти методы особенно эффективны при комплексном применении в сложных энергообъединениях [4].

Проведенный анализ демонстрирует, что явление резонанса в современных электрических цепях приобретает новые аспекты, связанные с распределенным характером параметров и наличием высших частотных составляющих. Практическая значимость резонансных явлений расширилась от традиционных применений в радиотехнике до критически важных аспектов устойчивости энергосистем. Современные методы управления резонансом основаны на активном воздействии на параметры цепи и требуют комплексного подхода, учитывающего нелинейные процессы и взаимовлияние элементов системы. Дальнейшее развитие исследований в этой области связано с созданием интеллектуальных систем прогнозиро-

вания и предотвращения резонансных режимов в условиях роста доли распределенной генерации и силовой электроники.

Список литературы:

1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 2007. – 701 с. Электронный ресурс: URL: <https://djvu.online/file/mjfgGdh3w0mxT> (дата обращения: 26.10.2025.).
2. Демирчян, К.С., Нейман, Л.Р., Коровкин, Н.В., Чечурин ,В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. – СПб.: Питер, 2003. – Т. – 445 с. Электронный ресурс: URL: https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2020/01/30/nejman_teo_osn_eltex_t1.pdf (дата обращения 26.10.2025.).
3. Зевеке, Г.В., Ионкин, П.А., Нетушил, А.В., Страхов, С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. Электронный ресурс: URL: <https://djvu.online/file/zXsDAHPXHJh?ysclid=mh4vwyx8bf55405258> (дата обращения: 26.10.2025.).
4. Федоров, Н.Н. Резонансные явления в электроэнергетических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с. Электронный ресурс: URL: <https://www.twirpx.com/file/2854337/> (дата обращения: 26.10.2025).
5. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с. Электронный ресурс: URL: <https://djvu.online/file/KaTnJve3c1B9R?ysclid=mh4vydgp1x250307748> (дата обращения: 26.10.2025).
6. Голуб, И.И., Прокопьев, Г.В. Анализ резонансных явлений в распределительных сетях 6-10 кВ // Электричество. – 2018. – № 3. – С. 24-30.

Информация об авторах:

Минлигареев Никита Сергеевич, студент гр. ЭРб-241, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, handsomejee7y@mail.ru

Черникова Татьяна Макаровна, д.т.н., профессор, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, chtm.oe@kuzstu.ru