



ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА/POWER ENGINEERING

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89>

СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЯХ ЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ

Научная статья

Наумов О.Е.^{1,*}¹ORCID : 0009-0001-9165-7993;¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (oenaumov[at]jinr.ru)

Аннотация

В современных электрических сетях часто наблюдается повышенный уровень гармонических составляющих токов и напряжений, обусловленных, как правило, нелинейными нагрузками. Как следствие, возникает задача анализа характеристик электрической сети в широком частотном диапазоне. При этом на результаты существенное влияние оказывают выбранные модели отдельных элементов сети. В данной статье представлены результаты сопоставительного анализа частотных характеристик узловых сопротивлений, рассчитанных при представлении линейной нагрузки различными математическими моделями. Показано, что характеристики узловых сопротивлений для различных моделей нагрузки значительно отличаются как по амплитуде, так и по характеру изменения сопротивления в функции частоты. Выбор модели нагрузки также оказывает сильное влияние на резонансные частоты и условия появления резонанса. Для трех моделей обнаружено практическое совпадение резонансных частот в широком диапазоне изменения параметров сети и мощности нагрузки. Выбор модели нагрузки оказывает существенное влияние на частотные характеристики узловых сопротивлений, и это необходимо учитывать при исследовании сети в области частот высших гармоник.

Ключевые слова: модель линейной нагрузки, частотная характеристика, высшие гармоники, резонанс.

COMPARISON OF FREQUENCY RESPONSE OF ELECTRICAL NETWORK NODES UNDER VARIOUS LINEAR LOAD MODELS

Research article

Наумов О.Е.^{1,*}¹ORCID : 0009-0001-9165-7993;¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

* Corresponding author (oenaumov[at]jinr.ru)

Abstract

Modern electrical networks often exhibit elevated levels of harmonic components in currents and voltages, usually caused by nonlinear loads. As a result, there is a need to analyze the characteristics of electrical networks across a wide frequency range. The results are significantly influenced by the models selected for individual network elements. This article presents the results of a comparative analysis of the frequency response of node resistances calculated when representing a linear load using various mathematical models. It is shown that the characteristics of node resistances for different load models differ significantly in both amplitude and the nature of the resistance change as a function of frequency. The choice of load model also has a strong influence on the resonance frequencies and conditions for resonance to occur. For three models, a practical coincidence of resonance frequencies was found over a wide range of network parameters and load power. The choice of load model has a significant effect on the frequency characteristics of node resistances, and this must be taken into account when studying the network in the range of higher harmonic frequencies.

Keywords: linear load model, frequency response, higher harmonics, resonance.

Введение

Присутствие высших гармоник в электрических сетях является одной из основных проблем обеспечения качества электроэнергии. Массовое использование выпрямителей, частотно-регулируемых приводов и другой преобразовательной техники приводит к генерации широкого спектра гармоник. При совпадении частот гармоник с собственными частотами сети возникают параллельные и последовательные резонансы, приводящие к значительному увеличению амплитуд напряжений и токов высших гармоник, что оказывает негативное влияние на элементы сети, особенно на батареи конденсаторов. Для оценки возможности возникновения резонансных процессов и выработки мер по их предотвращению необходимо знание частотных свойств электрической сети и ее отдельных элементов. При этом анализ производится в частотном диапазоне от основной гармоники до 40-й либо 50-й гармоники.

Элементы электрической сети в расчетах на частотах высших гармоник обычно представляются математическими моделями в виде схем замещения, параметры которых являются частотно-зависимыми. В литературе представлено множество таких моделей для воздушных и кабельных линий электропередачи, трансформаторов, нелинейных нагрузок. Для линейных нагрузок также предложен ряд моделей. Так, например, широко известна модель СИГРЭ [1], выведенная в ходе экспериментальных исследований для частотного диапазона от 5-й до 20-й гармоник. Несколько моделей было представлено в [2] и [3]. В [4] рассмотрены семь моделей нагрузки, начиная от простейшей в виде

независимого от частоты активного сопротивления и заканчивая моделью СИГРЭ. В [5] рекомендовано представлять линейную НГ в виде последовательной RX-цепочки с параметрами, зависящими от частоты. В [6] для моделирования линейной НГ на частотах гармоник предложено лишь одно выражение, предусматривающее линейное уменьшение проводимости ветви нагрузки с ростом частоты. Разрабатываются и более сложные модели; например, в [7] предложена детализированная модель нагрузки, которая может применяться как для расчета динамических режимов, так и для исследования высших гармоник; она успешно использовалась для изучения процессов в существующей распределительной кабельной сети на частотах гармоник.

Учитывая разнообразие моделей, возникает вопрос о степени совпадения результатов, полученных при представлении элемента сети той или иной моделью. Например, в [8] на примере 68-узловой сети исследовано влияние выбора модели для линий передачи и трансформаторов на уровень гармоник в сети. Установлено, что численные значения существенно различаются между собой, при этом максимальный уровень гармоник достигается при выборе сосредоточенной модели для линий и модели трансформатора без учета скин-эффекта, а минимальный — при выборе модели линии с распределенными параметрами и модели трансформатора, учитывающей скин-эффект как hR , где h — номер гармоники. Для линейных нагрузок разные способы их представления в сети также приводят к различным результатам моделирования, причем попытки исследовать степень этого различия приводят к неоднозначным результатам. В целом, доказано, что сам по себе учет комплексных сопротивлений нагрузок при расчете режимов высших гармоник (по сравнению со случаем, когда этими сопротивлениями пренебрегается) оказывает демпфирующее влияние, снижая расчетный уровень высших гармоник [9], [10], [11]. В [2] указывается, что для рассмотренных там моделей нагрузок, несмотря на некоторое различие амплитудно-частотных характеристик, их влияние на АЧХ сопротивлений узлов практически не сказалось, и можно пользоваться любой из этих моделей с равным успехом. В то же время в [3], [12] отмечается, что выбор модели нагрузки оказывает существенное влияние на величины узловых сопротивлений, в частности возле точки параллельного резонанса; то же самое касается и распространения гармоник в сети [3], [4]. В [4] на примере 18-узловой тестовой распределительной сети IEEE исследовалось влияние выбора модели нагрузки на результаты расчета распределения высших гармоник. Показано, что для различных моделей нагрузки резонанс наступает на примерно одинаковых частотах, в то время как величины узловых сопротивлений на резонансных частотах существенно различаются: некоторые результаты отличаются от усредненного по всем моделям значения на 50% и более. Однако различные схемы замещения линейной нагрузки имеют совершенно разный характер изменения комплексного сопротивления в функции частоты. Поэтому указанное совпадение резонансных частот, скорее всего, не будет иметь место для других сетей. Тогда возникает вопрос о степени близости резонансных частот и, в несколько более общей постановке вопроса, о совпадении резонансных условий, если линейная нагрузка учитывается с помощью разных моделей.

Таким образом, необходимо дальнейшее исследование частотных свойств электрических сетей при использовании различных моделей нагрузки, с целью устранения отмеченных расхождений в результатах моделирования. Исходя из этого, целью данной работы является сопоставительный анализ частотных характеристик узлов электрической сети при представлении линейной нагрузки различными математическими моделями.

Методы и принципы исследования

Для проведения исследования были взяты семь моделей линейной нагрузки из [1], [2], [4], схемы замещения и параметры которых приведены на рис. 1. В расчетных формулах P и Q — активная и реактивная мощность, потребляемые нагрузкой на основной частоте сети (50 Гц), U — номинальное напряжение сети, h — порядковый номер гармоники.

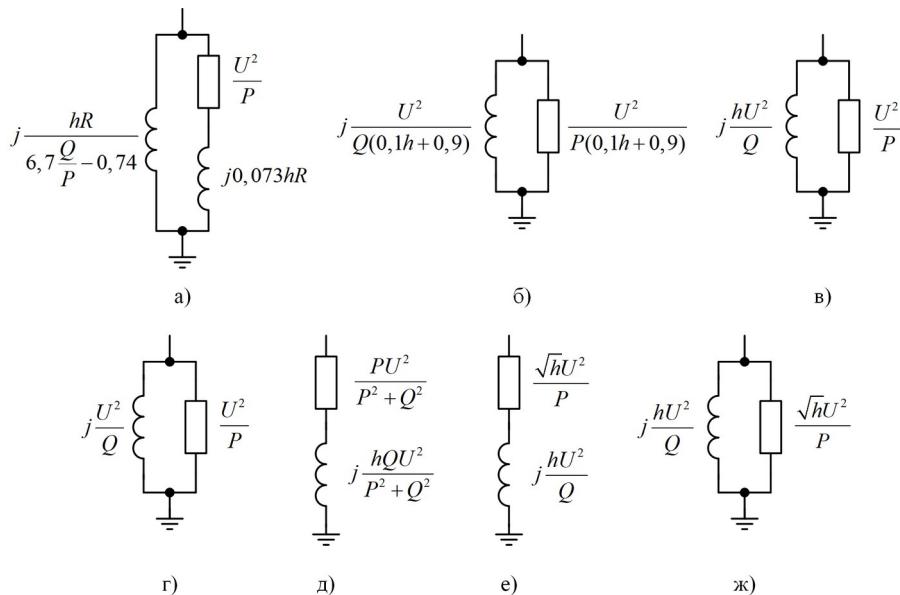


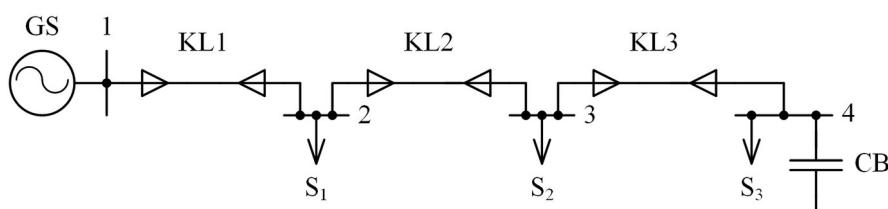
Рисунок 1 - Схемы замещения и параметры моделей линейной нагрузки:

а - модель 1 (СИГРЭ); б - модель 2, в - модель 3; г - модель 4; д - модель 5; е - модель 6; жс - модель 7

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.1>

Модель 1 была разработана по данным экспериментальных исследований сетей среднего напряжения с использованием генераторов звуковой частоты. Остальные модели являются теоретическими и отражают факт протекания токов высших гармоник через нагрузку, а также демпфирующий эффект нагрузки при возникновении резонансных условий в системе. В самом простом случае (модель 4) нагрузка представляется активным и индуктивным сопротивлениями, не зависящими от частоты, что, однако, не является физически обоснованным. Модель 2 отличается от других тем, что в ней и активное и индуктивное сопротивление уменьшаются с возрастанием частоты, причем в одинаковой степени. Обоснование этому не приводится, и данное уменьшение не отражает реального поведения активно-индуктивных цепей при изменении частоты напряжения. В моделях 3 и 5 активное сопротивление принимается независимым от частоты, а индуктивное линейно возрастает с ростом частоты. В моделях 6 и 7 учитывается частотная зависимость как для индуктивного, так и для активного сопротивления; в случае активного сопротивления это отображает скин-эффект, особенно заметный на высоких частотах. В целом, модели 6 и 7 наиболее полно отражают физические процессы, протекающие в линейной нагрузке на частотах высших гармоник.

Расчеты выполнялись для модельной электрической сети с номинальным напряжением 10 кВ, схема которой представлена на рис. 2.

Рисунок 2 - Схема модельной сети
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.2>

Параметры элементов сети следующие:

- система GS: мощность короткого замыкания системы $S_{k3}=200$ МВА, отношение $R/X=0,2$;

- кабельные линии: KL1 длиной 3 км, KL2 и KL3 длиной 2 км, удельные сопротивления на частоте 50 Гц для всех линий: $R_0=0,124$ Ом/км, $X_0=0,143$ Ом/км, удельная емкость $C_0=0,357$ мкФ/км;

- нагрузки: $S_1=2+j1$ МВА, $S_2=1+j0,5$ МВА. Мощность нагрузки S_3 в узле 4 изменялась в ходе исследования, вначале принята равной $S_3=1+j0,5$ МВА;

- батарея конденсаторов CB: мощность 500 квар, затем 1000 квар; в начале исследования отключена.

Анализ частотных свойств сети производился с использованием амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик собственных узловых сопротивлений Z_u . Частота в расчетах изменялась от 50 до 2500 Гц, что соответствует интервалу от 1-й до 50-й гармоники сетевого напряжения. Шаг изменения частоты составлял 1 Гц. При составлении графиков по горизонтальной оси откладывались не абсолютные значения частот, а соответствующие им порядковые номера гармоник, что более удобно для сопоставления с каноническими гармониками и часто используется в литературе (см., например, [2], [4], [6]).

По схеме рис. 2 была составлена расчетная модель сети, в которой нагрузка представлялась поочередно каждой из схем замещения, приведенных на рис. 1. Кабельные линии учитывались П-образными схемами замещения, питающая система — RX-цепочкой, конденсаторная батарея — емкостным сопротивлением.

Основные результаты

На рис. 3 представлены АЧХ и ФЧХ, рассчитанные для узла 4 при исходных данных.

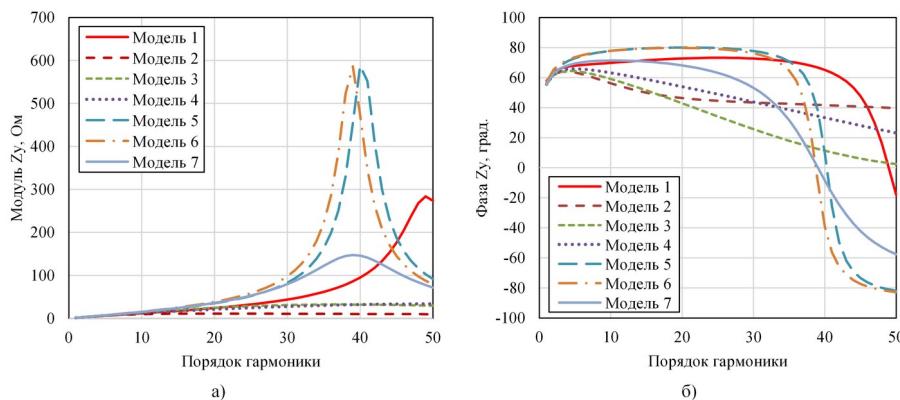


Рисунок 3 - АЧХ (а) и ФЧХ (б) для узла 4 при исходных данных

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.3>

Из рис. 3 очевидно, что как амплитудно-частотные, так и фазочастотные характеристики узла при представлении нагрузки различными моделями значительно отличаются. Аналогичный вывод был сделан и для остальных узлов подключения нагрузок (узлы 2 и 3 на рис. 2). Для моделей 5, 6 и 7 наблюдается параллельный резонанс в районе 40-й гармоники, а для модели 1 — в районе 50-й гармоники; остальные модели не приводят к резонансу в диапазоне частот до 50-й гармоники. В данном случае, при отсутствии батарей конденсаторов, возникновение параллельного резонанса обусловлено емкостями кабельных линий, образующих колебательные контуры с индуктивными сопротивлениями линий и питающей системы. Модули Z_y отличаются между собой особенно значительно в области резонанса, где разница между характеристиками достигает 20 и более раз. Следует отметить, что резонансные частоты для моделей 5, 6 и 7 отличаются между собой не более чем на 3,9%.

Были проведены расчеты частотных характеристик при варьировании удельных параметров кабельных линий, их длины, а также мощности короткого замыкания питающей системы как в меньшую, так и в большую сторону относительно исходных величин. Результаты расчетов показали, что в большинстве вариантов при использовании моделей 5, 6 и 7 наблюдался параллельный резонанс, при этом его частота оказывалась в интересующей полосе частот (50-2500 Гц). При использовании остальных моделей резонанса либо вообще не было, либо он был за пределами указанного диапазона. Однако даже и в таких случаях наблюдалось существенное различие характеристик для разных моделей. В качестве примера на рис. 4 приведены АЧХ и ФЧХ для узла 3, рассчитанные для тех же начальных данных, за исключением того, что длины всех линий были приняты равными 1 км. Из рис. 4 видно, что в данном случае резонанса нет, однако различие между наибольшим (для модели 6) и наименьшим (для модели 2) значениями Z_y на верхней границе расчетного диапазона достигает 14,8 раза. Если ограничиться диапазоном, в котором существуют наиболее мощные канонические гармоники, часто наблюдающиеся в электрических сетях (до 25-й гармоники, т.е. до частоты 1250 Гц), то в нем различие между характеристиками достигает 3,3 раза. Следует отметить, что характеристики для моделей 5, 6 и 7 здесь также оказались близки между собой: в диапазоне частот до 1250 Гц они различаются по амплитуде не более чем на 5,7%, а на верхней границе расчетного диапазона — не более чем на 11,5%. Аналогичная ситуация с этими моделями наблюдалась и в других узлах подключения нагрузки, во всех расчетных вариантах.

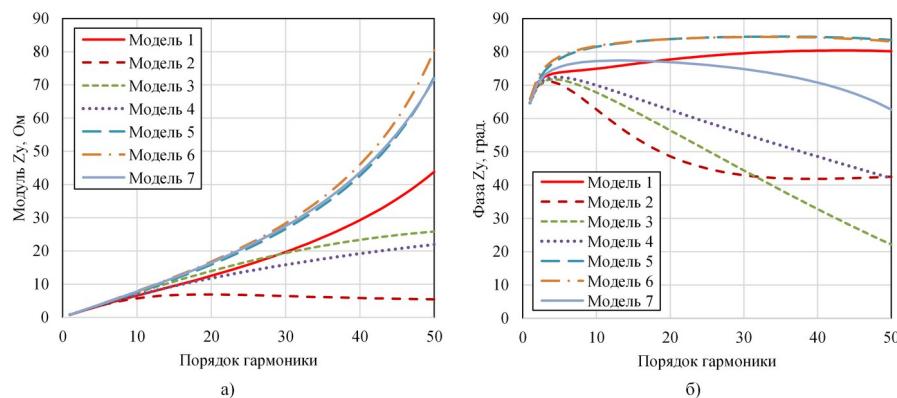


Рисунок 4 - АЧХ (а) и ФЧХ (б) для узла 3 при длинах кабельных линий, равным 1 км
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.4>

Далее расчеты производились при увеличении мощности нагрузки в узле 4 от $1+j1$ МВА до $4+j3$ МВА с шагом 1 МВт по активной мощности и 1 Мвар по реактивной мощности. На рис. 5 и 6 приведены соответствующие амплитудно-частотные характеристики для узла 4. Как видно из рисунков, выбор модели нагрузки существенно влияет не только на величину АЧХ, но и на характер ее изменения по мере увеличения активной и реактивной мощности нагрузки.

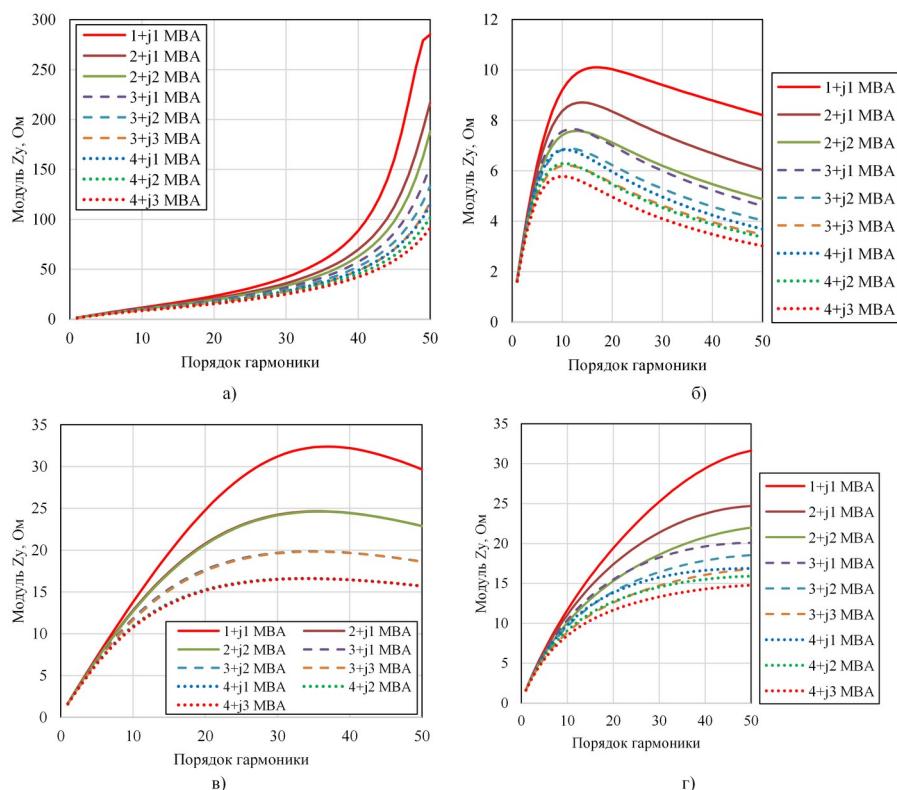


Рисунок 5 - АЧХ для узла 4 при изменении мощности нагрузки:
а - для модели 1; б - для модели 2; в - для модели 3; г - для модели 4
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.5>

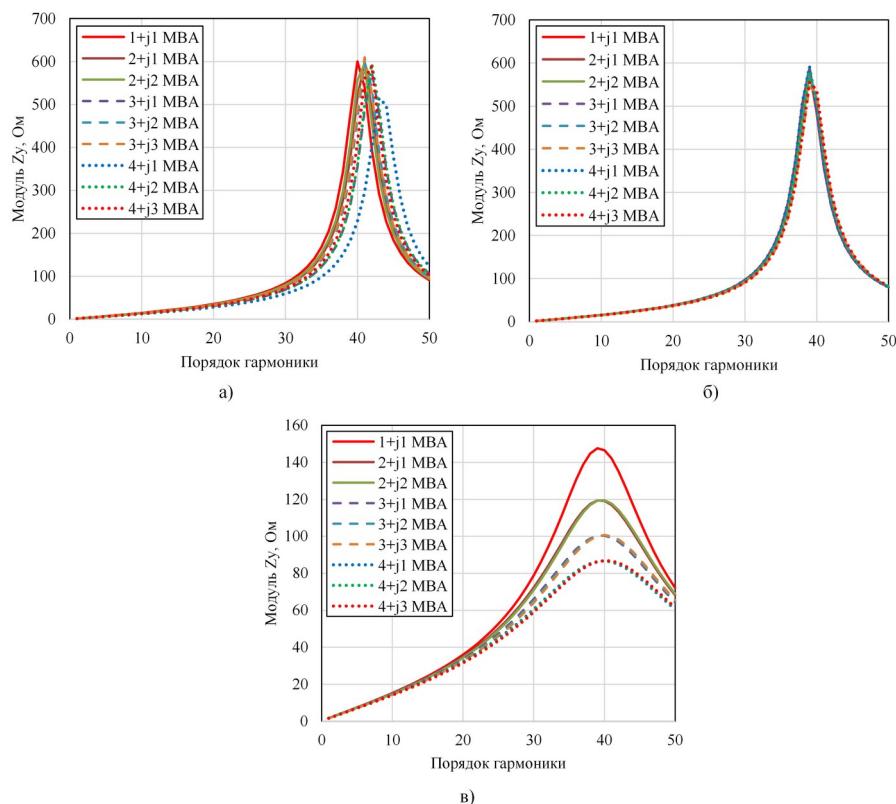


Рисунок 6 - АЧХ для узла 4 при изменении мощности нагрузки:

а - для модели 5; б - для модели 6; в - для модели 7

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.6>

Модель 1: монотонное уменьшение амплитуды характеристики с увеличением мощности, резонансные явления до 2500 Гц отсутствуют.

Модель 2: имеется максимум характеристики, однако он не характеризует параллельный резонанс, так как фазочастотная характеристика (не показанная здесь для упрощения) не проходит в данном случае через ноль. Абсолютные величины узлового сопротивления, как и ранее, существенно меньше по величине, чем у других моделей.

Модель 3: также есть слабо выраженный максимум и, как и в предыдущем случае, не связанный с параллельным резонансом. Для этой модели наблюдается группировка зависимостей по активной мощности: изменение реактивной мощности в широких пределах (например, от 1 до 3 Мвар) при одной и той же активной мощности практически не влияет на форму и амплитуду характеристики.

Модель 4: монотонное уменьшение амплитуды с увеличением мощности нагрузки, резонансные явления до 2500 Гц отсутствуют. Абсолютные величины характеристик Z_y близки к таковым для модели 3, но здесь имеется выраженная зависимость от величины реактивной мощности.

Модель 5: изменение характеристики в функции мощности (как активной, так и реактивной) слабо выражено в области до $3+j3$ МВА, далее отношение P/Q оказывает большее влияние. Во всех случаях наблюдается параллельный резонанс, при увеличении мощности от $1+j1$ МВА до $4+j3$ МВА резонансная частота изменяется на 159 Гц.

Модель 6: характеристика практически одинакова для всех мощностей. При увеличении мощности от $1+j1$ МВА до $4+j3$ МВА амплитуда характеристики на частоте резонанса изменяется всего на 4,97%, а сама резонансная частота — на 23 Гц.

Модель 7: как и для модели 3, наблюдается группировка зависимостей по активной мощности. Во всех случаях имеется параллельный резонанс, его частота при увеличении мощности от $1+j1$ МВА до $4+j3$ МВА изменяется всего на 51 Гц.

Если в сети среднего напряжения есть батареи конденсаторов для компенсации реактивной мощности, то их влияние на частотные характеристики узлов сети, как правило, оказывается решающим. Включение батареи конденсаторов практически всегда приводит к появлению параллельных (а иногда и последовательных) резонансов в диапазоне частот от 2500 Гц. Для данной модельной схемы был проведен расчет частотных характеристик при мощности нагрузки S_3 , равной $2+j1$ МВА, и включений конденсаторной батареи СВ на ее шинах с мощностью 500 кварт, а затем 1000 кварт. Результаты расчета резонансных частот (для параллельных резонансов) и соответствующих максимумов АЧХ приведены в табл. 1. и табл. 2 соответственно.



Таблица 1 - Резонансные частоты узлов нагрузки при наличии батареи конденсаторов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.7>

Узел	Резонансная частота, Гц, для модели нагрузки						
	1	2	3	4	5	6	7
Мощность батареи 500 квар							
2	662	-	528	592	584	557	554
3	682	-	555	623	588	560	565
4	698	799	584	662	590	562	572
Мощность батареи 1000 квар							
2	451	-	385	417	418	399	397
3	466	520	401	435	421	402	405
4	479	477	416	454	424	404	411

Таблица 2 - Резонансные максимумы АЧХ узлов нагрузки при наличии батареи конденсаторов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.89.8>

Узел	Резонансный максимум АЧХ, Ом, для модели нагрузки						
	1	2	3	4	5	6	7
Мощность батареи 500 квар							
2	14,37	-	9,73	9,72	33,29	35,29	19,15
3	24,53	-	14,99	15,22	56,41	59,04	31,49
4	39,88	-	22,33	23,68	85,99	88,48	47,28
Мощность батареи 1000 квар							
2	9,93	-	8,17	8,19	19,73	21,28	13,37
3	16,63	7,89	12,86	13,09	33,48	35,68	22,05
4	26,75	13,43	19,39	20,37	51,62	54,05	33,45

На этом этапе исследования, помимо параллельных, в узлах 2 и 3 зафиксированы также и последовательные резонансы, характеризуемые локальным минимумом АЧХ. При мощности батареи 500 квар для узла 2 они находились в диапазоне от 17-й до 22-й гармоники (в зависимости от принятой модели нагрузки), для узла 3 – в диапазоне от 23-й до 29-й гармоники; при мощности батареи 1000 квар диапазоны составили от 13-й до 16-й и от 17-й до 21-й гармоники соответственно.

Как видно из табл. 1, резонансные частоты для моделей 5, 6 и 7 и в этом случае практически совпадают, различие между ними не превышает 5,3%. Характеристики для модели 2, как и ранее, сильно отличаются по форме и амплитуде от характеристик других моделей; резонанс имеется не всегда, и в том случае, когда он присутствует, частота значительно отличается от резонансных частот характеристик других моделей.

Из таблицы 2 следует, что для моделей 5 и 6 величины резонансных максимумов, как и резонансные частоты, практически совпадают: различие не превышает 7,3%. Однако для модели 7 характеристика проходит существенно ниже, и ее максимум почти вдвое меньше, чем для моделей 5 и 6. Характеристики моделей 3 и 4 близки по амплитуде (различие не более 5,7%), но имеют существенно разные резонансные частоты, как можно видеть из таблицы 1. Характеристики моделей 1 и 2, в свою очередь, сильно отличаются от предыдущих как по величине узлового сопротивления, так и по резонансным частотам.

Проведенные расчеты для условия включения батареи конденсаторов различной мощности в других узлах нагрузки (узлы 2 и 3 на рис. 2) привели к качественно таким же результатам.

Заключение

Наиболее общий вывод данного исследования состоит в том, что частотные характеристики узловых сопротивлений при разных моделях нагрузки существенно различаются между собой как по амплитуде, так и по резонансным частотам. Это не согласуется с выводами, приведенными в [2], и частично согласуется с данными, приведенными в [4]. В [4] указано, что при разных моделях нагрузки величины узловых сопротивлений различаются, а резонансные частоты практически одинаковы; между тем приведенные здесь результаты показывают, что и резонансные частоты также существенно различны. Предположительно, это может быть объяснено уменьшением вклада нагрузки в частотные характеристики узлов по мере увеличения размера сети и удельного соотношения сопротивлений нагрузки и других элементов (линии электропередачи, трансформаторы и др.). Следовательно, необходимо дальнейшее исследование этого вопроса на примере более крупных модельных сетей.



Изменение частотных характеристик при увеличении мощности нагрузки, а также при изменении соотношения Р/Q также неодинаково для разных моделей нагрузки. Для моделей 3 и 7 изменение соотношения Р/Q практически не влияет на АЧХ. Для модели 6 характеристика практически не изменяется как при увеличении мощности нагрузки, так и при изменении соотношения Р/Q; несколько большее влияние указанные факторы оказывают на характеристики для модели 5.

Для моделей 5, 6 и 7 резонансные частоты (а для моделей 5 и 6 – также и амплитуды) оказались практически одинаковыми во всех вариантах расчетов. Поэтому при исследовании электрических сетей на предмет появления резонансов можно использовать любую из них. Другие модели нагрузки дают существенно отличные результаты. В особенности это характерно для модели 2, что объяснимо уменьшением ее активного и индуктивного сопротивления с ростом частоты, в то время как параметры других моделей либо принимаются неизменными, либо характеризуются возрастающими функциями от частоты. Учитывая, что расчетные выражения модели 2 не имеют обоснования и не согласуются с физикой процессов на высших частотах, ее применение не рекомендуется. В целом следует заключить, что выбор той или иной модели нагрузки для проведения исследований электрической сети в области частот высших гармоник (например, поиск резонансных частот) окажет значительное влияние на получаемые результаты.

Поскольку для различных моделей нагрузки частотные характеристики получаются существенно различными, возникает вопрос о том, какая модель наиболее адекватно описывает частотные свойства линейной нагрузки. Представляется необходимым проведение экспериментальных исследований в данной области и сопоставление полученных данных с приведенными здесь результатами.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. CIGRE Working Group 36-05 (Disturbing Loads). Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network // Electra. — 1981. — Vol. 1. — № 77. — P. 35–54.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. — Москва : Энергоатомиздат, 2000. — 331 с.
3. Burch R. Impact of aggregate linear load modeling on harmonic analysis: a comparison of common practice and analytical models / R. Burch, G.-K. Chang, C. Hatzidioniu [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2003. — Vol. 18. — № 2. — P. 625–630. — DOI: 10.1109/TPWRD.2003.810492.
4. Milovanović M. Impact of Linear Load Modeling on Harmonic Power Flow Results in Distribution Networks / M. Milovanović, J. Radosavljević, S. Rakocević [et al.] // 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). — East Sarajevo, 2024. — P. 1–7. — DOI: 10.1109/INFOTEH60418.2024.10495986.
5. IEEE Std 3002.8-2018. IEEE Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems. — 2018. — 79 p. — DOI: 10.1109/IEEEESTD.2018.8479357.
6. Fuchs E.F. Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives / E.F. Fuchs, M.A.S. Masoum. — Elsevier, 2023. — 1263 p.
7. Milani M.T. Detailed EMT-Type Load Modeling for Power System Dynamic and Harmonic Studies / M.T. Milani, B. Khodabakhchian, J. Mahseredjian // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2023. — Vol. 38. — № 1. — P. 703–711. — DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3197243.
8. Zhu J. The Effect of Network Modelling on Harmonic Propagation Studies in Power Electronics Rich Transmission Networks / J. Zhu, E. Bećirović, J.V. Milanović // 11th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2018). — Hong Kong, 2018. — P. 1–6. — DOI: 10.1049/cp.2018.1772.
9. Bordini Braga N. Electrical System Load Modeling and its Impact on Harmonic Analysis of a Wind Power Plant / N. Bordini Braga, L. da Silva Passos, R.B. da Silveira Santos [et al.] // IEEE Latin America Transactions. — 2020. — Vol. 18. — № 03. — P. 554–563. — DOI: 10.1109/TLA.2020.9082727.
10. Pihkala A. The Importance of Realistic Load Modeling in Power System Harmonic Resonance Analysis / A. Pihkala, P. Heine, B.J.O. Sousa // 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). — Dublin, 2018. — P. 1–7. — DOI: 10.23919/PSCC.2018.8442870.
11. Hatzidioniu C.J. Modeling of linear components for harmonic studies / C.J. Hatzidioniu // IEEE Power Engineering Society General Meeting. — Denver, 2004. — Vol. 1. — P. 766–768. — DOI: 10.1109/PES.2004.1372919.
12. Vieira F.L. Harmonic Studies in OpenDSS Considering Renewable DG and Aggregate Linear Load Models / F.L. Vieira, P.F. Ribeiro, B.D. Bonatto [et al.] // 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). — Sao Paulo, 2018. — P. 202–207. — DOI: 10.1109/INDUSCON.2018.8627343.

Список литературы на английском языке / References in English

1. CIGRE Working Group 36-05 (Disturbing Loads). Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network // Electra. — 1981. — Vol. 1. — № 77. — P. 35–54.

2. Zhezhelenko I.V. Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiij [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises] / I.V. Zhezhelenko. — Moscow : Energoatomizdat, 2000. — 331 p. [in Russian]
3. Burch R. Impact of aggregate linear load modeling on harmonic analysis: a comparison of common practice and analytical models / R. Burch, G.-K. Chang, C. Hatziadoniu [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2003. — Vol. 18. — № 2. — P. 625–630. — DOI: 10.1109/TPWRD.2003.810492.
4. Milovanović M. Impact of Linear Load Modeling on Harmonic Power Flow Results in Distribution Networks / M. Milovanović, J. Radosavljević, S. Rakočević [et al.] // 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). — East Sarajevo, 2024. — P. 1–7. — DOI: 10.1109/INFOTEH60418.2024.10495986.
5. IEEE Std 3002.8-2018. IEEE Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems. — 2018. — 79 p. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8479357.
6. Fuchs E.F. Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives / E.F. Fuchs, M.A.S. Masoum. — Elsevier, 2023. — 1263 p.
7. Milani M.T. Detailed EMT-Type Load Modeling for Power System Dynamic and Harmonic Studies / M.T. Milani, B. Khodabakhchian, J. Mahseredjian // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2023. — Vol. 38. — № 1. — P. 703–711. — DOI: 10.1109/TPWRD.2022.3197243.
8. Zhu J. The Effect of Network Modelling on Harmonic Propagation Studies in Power Electronics Rich Transmission Networks / J. Zhu, E. Bećirović, J.V. Milanović // 11th IET International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2018). — Hong Kong, 2018. — P. 1–6. — DOI: 10.1049/cp.2018.1772.
9. Bordini Braga N. Electrical System Load Modeling and its Impact on Harmonic Analysis of a Wind Power Plant / N. Bordini Braga, L. da Silva Passos, R.B. da Silveira Santos [et al.] // IEEE Latin America Transactions. — 2020. — Vol. 18. — № 03. — P. 554–563. — DOI: 10.1109/TLA.2020.9082727.
10. Pihkala A. The Importance of Realistic Load Modeling in Power System Harmonic Resonance Analysis / A. Pihkala, P. Heine, B.J.O. Sousa // 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC). — Dublin, 2018. — P. 1–7. — DOI: 10.23919/PSCC.2018.8442870.
11. Hatziadoniu C.J. Modeling of linear components for harmonic studies / C.J. Hatziadoniu // IEEE Power Engineering Society General Meeting. — Denver, 2004. — Vol. 1. — P. 766–768. — DOI: 10.1109/PES.2004.1372919.
12. Vieira F.L. Harmonic Studies in OpenDSS Considering Renewable DG and Aggregate Linear Load Models / F.L. Vieira, P.F. Ribeiro, B.D. Bonatto [et al.] // 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON). — Sao Paulo, 2018. — P. 202–207. — DOI: 10.1109/INDUSCON.2018.8627343.