

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.333.2

© Кривонос В.Е.¹, Злепко С.М.², Павлов С.В.³

СКОРОСТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ФРОНТА НАПРЯЖЕНИЯ КАК ИНФОРМАЦИОННОГО ПАРАМЕТРА В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ И ЗАЩИТЫ РЕНТГЕНОВСКОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ТОМОГРАФА

Неисправности, возникающие при работе диагностических аппаратов, можно разделить на внешние, связанные с некачественным питанием системы электропитания питающей сети, и внутренние, связанные с поломками блоков и элементов самих аппаратов. Особенно чувствительны к некачественному напряжению питающей сети рентгеновские компьютерные томографы (РКТ). Элементы РКТ обладают большой величиной индуктивности L . Провалы напряжения приводят к внутренним перенапряжениям на блоках РКТ. Для защиты РКТ использование скоростной характеристики изменения фронта напряжения в качестве информационного параметра при диагностировании аварийных режимов питающей сети позволяет увеличить быстродействие при диагностировании режима сети в три раза. Исследованы изменения величины скоростной характеристики при различных значениях коэффициента несинусоидальности напряжения, уровней отклонений напряжений и колебаниях частоты в питающей сети. Определены диапазон изменения скоростной характеристики при выявлении провалов, отклонений напряжения и установлены зоны нормальной работы РКТ и перехода в аварийный режим.

Ключевые слова: рентгеновский компьютерный томограф, показатели качества электроэнергии, зона чувствительности, скоростная характеристика изменения фронта напряжения.

Кривонос В.Є., Злепко С.М., Павлов С.В. Швидкісна характеристика фронту напруги як інформаційного параметру в системах діагностики і захисту рентгенівського комп'ютерного томографа. *Несправності, що виникають при роботі діагностичних апаратів, можна розділити на зовнішні, пов'язані з неякісним живленням системи електропостачання мережі живлення, і внутрішні, пов'язані з поломками блоків і елементів самих апаратів. Особливо чутливі до неякісної напруги мережі живлення рентгенівські комп'ютерні томографи (РКТ). Елементи РКТ мають велику величину індуктивності L . Провали напруги призводять до внутрішніх перенапруг на блоках РКТ. Для захисту РКТ використання швидкісної характеристики зміни фронту напруги у якості інформаційного параметру при діагностуванні аварійних режимів мережі живлення дозволяє збільшити швидкодію при діагностуванні режиму мережі в три рази. Досліджено зміни величини швидкісної характеристики при різних значеннях коефіцієнта несинусоїдальності напруги, рівнів відхилень напруг і коливаннях частоти в мережі живлення. Визначено діапазон зміни швидкісної характеристики при виявленні провалів, відхилень напруги і встановлено зони нормальної роботи РКТ і переходу в аварійний режим.*

Ключові слова: рентгенівський комп'ютерний томограф, показники якості електроенергії, зона чутливості, швидкісна характеристика зміни фронту напруги.

¹ канд. техн. наук, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Мариуполь, yhtverf007@ukr.net

² д-р техн. наук, Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, smzlepko@ukr.net

³ д-р техн. наук, Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця

V.E. Krivonosov, S.M. Zlepko, S.V. Pavlov. Speed characteristic of the voltage front as an information parameter in the systems of diagnostics and protection of an X-ray computer tomograph. Malfunctions that arise in the operation of diagnostics apparatus, can be divided into external, associated with poor-quality power supply system, and internal, resulting from the breakdown of blocks and elements of the devices themselves. The X-ray computer tomograph (RCT) is particularly sensitive to low-quality power supply. All the parts of the RCT possess high inductance L. Voltage drops result in internal overvoltages on the blocks of the RCT. To protect RCT, the use of high-speed characteristics of the voltage front change as the information parameter when detecting the emergency modes of the power supply network can treble the speed of the network mode detecting. Changes in the value of the speed characteristics at various values of the non-sinusoidal voltage, voltage deviations and frequency oscillations in the power supply network have been investigated. The range of the speed characteristic change for detecting voltage drops and voltage deviations have been developed, as well as the range for the normal operation of RCT and the range of the transition to an emergency mode.

Keywords: X-ray computer tomography, quality indicators, sensitivity zone, speed characteristic of voltage front change.

Постановка проблеми. Развитие компьютерных технологий позволило создать высоко достоверные средства диагностирования болезней, выявлять их симптомы на более ранней стадии, своевременно назначать и проводить коррекцию лечения, тем самым сокращая сроки выздоровления больных.

Современные диагностические аппараты являются сложными электромеханическими устройствами, насыщенными элементами автоматики, электроники и оптики. Достоверность поставленного диагноза болезни и проведение терапевтического лечения зависит от исправности диагностического оборудования. Неисправности, возникающие при работе диагностических аппаратов, можно разделить на внешние, связанные с некачественным питанием системы электроснабжения питающей сети, и внутренние, связанные с поломками блоков и элементов самих аппаратов [1]. Выход из строя диагностических аппаратов по причине аварийных режимов питающей сети составляет от 15% до 22% [2]. Особенно чувствительными к некачественному напряжению питающей сети, а именно к несанкционированным отключениям и провалам напряжения, являются РКТ, так как элементы РКТ обладают большой величиной индуктивности L . Если во время обследования происходит несанкционированное отключение напряжения, неполнофазный режим питающей сети, обрыв или ослабление соединений токоведущих частей, внезапный провал напряжения ниже величины $0,6 \cdot U_H$, где U_H – номинальное напряжение, и длительность которых выше 5 мс, это приводит к внезапному обесточиванию индуктивности, что вызывает появление на элементах РКТ ЭДС (электродвижущей силы) самоиндукции, определяемой выражением:

$$e = -L \frac{dI}{dt}.$$

Максимальная величина ЭДС возникает в момент прохождения одного из фазных токов пикового значения синусоиды, что вызывает появление максимального значения ЭДС и перенапряжения, величина которого многократно превышает номинальное значение рабочего напряжения, что является причиной выхода инвертора РКТ из строя.

Диагностические медицинские центры и лаборатории, в которых установлены РКТ, получают питания от комплектной трансформаторной подстанции (КТП) как потребители электроснабжения третьей категории. Как правило, с шин КТП получают питание бытовые электропотребители (жилые дома, офисы, кафе и др.), имеющие однофазную и нелинейную нагрузки, приводящие к изменению формы кривой напряжения. Примеры изменённых форм кривых напряжения при наличии нелинейной нагрузки, возникновении перенапряжений и провалов напряжений представлены на рис. 1.

Основным требованием к успешной работе медицинского оборудования является обеспечение качества напряжения на клеммах оборудования, а для проведения защиты медицинского оборудования при аварийных режимах в сети необходимо обеспечить достоверность диагно-

стики причин изменения уровня напряжений в питающей сети, сокращение времени проведения диагностических мероприятий и безаварийное отключение РКТ от сети при выявлении аномальных режимов в сети.

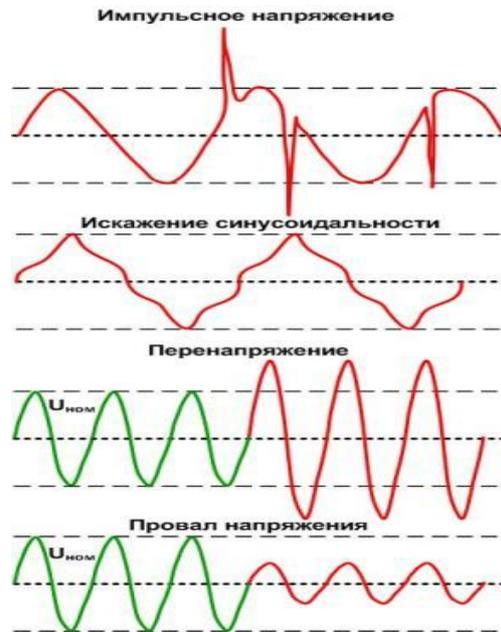


Рис. 1 – Формы кривых напряжений при аномальных режимах питающей сети

Анализ последних исследований и публикаций. Для обеспечения качества напряжения на клеммах медицинского оборудования, таких как МРТ, УЗИ, литотриптеры, устанавливают инверторно-аккумуляторные системы бесперебойного питания (СБП). СБП позволяют полностью защитить этот вид оборудования от провалов напряжения [3]. Однако использование СБП для защиты РКТ от внезапных провалов и несанкционированных отключений напряжений не всегда эффективно, так как длительность переключения СБП на резервное питание составляет 10 мкс для блоков бесперебойного питания мощностью до 10 кВт и 30 мкс для блоков питания мощностью более 100 кВт. Мощность РКТ составляет от 70 до 120 кВт.

При частоте питания 50 Гц время протекания аварийной ситуации, приводящей к поломке РКТ, составляет от 0 до 5 мкс. Внезапное прекращение питания в этот момент один раз из десяти случаев приводило к повреждению РКТ – выходу из строя инвертора. Повреждение РКТ происходит во время его максимальной нагрузки, то есть во время обследования пациента. Повреждение РКТ приводит к его дорогостоящему ремонту и к повторному облучению пациента.

Для обеспечения защиты РКТ необходимо обеспечить поддержание напряжения на клеммах РКТ в течение 40 мкс, а в течение не более 10 мкс выявить вид аварийного режима в питающей сети, уровень снижения напряжения, длительность провала и определить необходимость отключения РКТ от питающей сети.

Известно техническое решение защиты рентгеновского компьютерного томографа, в котором производится постоянное измерение трёх действующих линейных напряжений и трёх величин фазных токов, сравнение полученных величин с номинальными действующими значениями. По результатам сравнения диагностируются состояния токовых цепей и режимов питающей сети. При выявлении начального момента появления провала напряжения с помощью твердотельных реле (симисторных переключателей) осуществляют отключение РКТ от питающей сети. Поддержание напряжения на клеммах РКТ обеспечивается разрядом батарей конденсаторов, используемых для локальной компенсации реактивной мощности. Как известно [4], величина действующего напряжения определяется выражением:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int U^2 dt} , \quad (1)$$

где T – период.

Для промышленной частоты $f = 50$ Гц период равен 0,02 секунды или 20 мкс., а чувствительность при выявлении провала напряжения может составить более 20 мкс. Наличие высших гармонических составляющих в сети (рис. 1) приводит к изменению формы кривой синусоидального напряжения и неоднозначному определению мгновенного значения напряжения, а, соответственно, и его действующего значения. Погрешность при определении мгновенного значения напряжения может составлять до 30%, что снижает достоверность определения начального момента появления провала напряжения. Для сокращения времени выявления провала напряжения предлагается использовать скоростную характеристику изменения фронта напряжения.

Известны случаи, когда скоростные характеристики электрических параметров используются как информационные параметры в устройствах диагностики, их использование исследовано в работах [5, 6]. В технических средствах скоростные характеристики используются не только для диагностирования видов дефектов, но и для их идентификации [7, 8]. Поэтому повысить достоверность выявления аварийных режимов питающей сети и обеспечить безаварийную работу РКТ при обследовании больного возможно, если использовать в качестве диагностируемого критерия скоростную характеристику изменения фронта напряжения. Однако использование скоростной характеристики изменения фронта напряжения в качестве информационного параметра для проведения диагностики состояния сети и защиты РКТ недостаточно изучено в технической литературе.

Цель работы – выявить возможность использования скоростной характеристики изменения фронта напряжения в качестве информационного параметра при диагностировании аварийных режимов питающей сети; исследовать изменение величины скоростной характеристики для различных значений коэффициента несинусоидальности напряжения, уровней отклонений напряжений и колебания частоты в питающей сети; определить диапазон изменения скоростной характеристики при выявлении провалов, отклонений напряжения и установить границы режимных зон работы РКТ при изменении скорости фронта напряжения в нормальных и аварийных режимах сети, определить порог чувствительности при переходе скоростной характеристики из одной режимной зоны в другую.

Изложение основного материала. РКТ получают электропитания по отдельным линиям от комплектных трансформаторных подстанций (КТП) напряжением 6/0,4 кВ. К шинам КТП, кроме РКТ, подключены корпуса медицинского учреждения, жилые дома, магазины, кафе и другие потребители, как правило, имеющие однофазную и нелинейную нагрузки, а суточный график потребления активной мощности – с ярко выраженными максимумами и минимумами, что приводит к изменению показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на клеммах РКТ, а именно к изменению формы, уровня кривой напряжения и частоты.

Для оценки изменения ПКЭ, уровня кривой напряжения и частоты проведены измерения при работе различных видов медицинского оборудования:

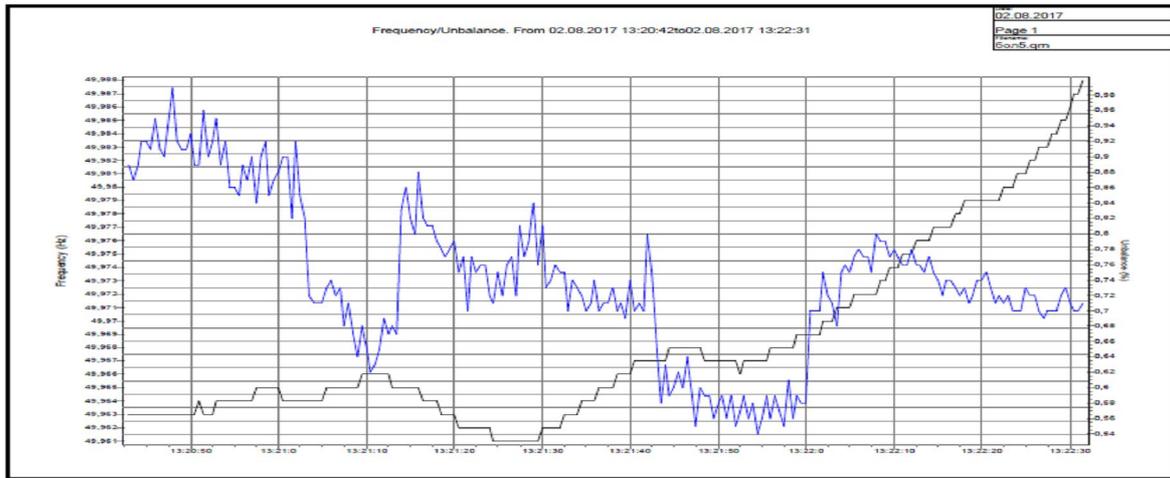
- РКТ: тип. Toshiba Aquilion 16 slice CT выпуска, 2007 г., мощность – 70 кВт, анодное напряжение – 135 кВ, установлен в больнице №5 г. Мариуполя. Питание РКТ осуществляется от двух трансформаторных КТП – 2-630кВа, 6/0,4 кВ, работающих без АВР. КТП осуществляет электроснабжение жилого квартала, больничного комплекса, мелких производственных предприятий и др.;

- РКТ: модель TSX-031 Alexion 16, паспорт № ПТ-148-2012, генератор мощностью 42 кВт, напряжение рентгеновской трубки – 80,100,120,135 кВ, ток рентгеновской трубки – 10 мА-500мА, шаг дискретизации – 10 мА/кВт, анодное напряжение – 135кВ. Питание РКТ осуществляется от двух трансформаторных КТП – 2-400кВа, 6/0,4 кВ, работающих без АВР. КТП осуществляет энергоснабжение жилого квартала, больничного комплекса больницы №3 г. Мариуполь;

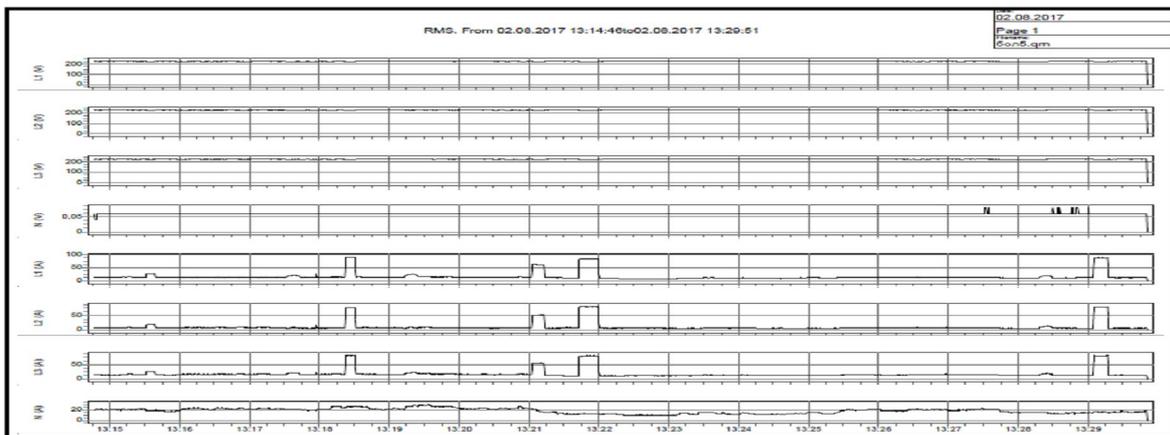
- МРТ: тип Hitachi AIRIS Vento, 2007 г. выпуска, мощностью излучения – 0,3 Тесла. Питание МРТ осуществляется от двух трансформаторных КТП – 2-400кВа, 6/0,4 кВ;

- на шинах двухтрансформаторной КТП – 2-400кВа, 6/0,4 кВ, работающей без АВР. КТП производит питания медицинского диагностического центра с установочной мощностью оборудования 135 кВт, ресторанного комплекса с установочной мощностью 85 кВт, административных зданий с установочной мощностью 50 кВт. На рис. 2 приведены осциллограммы изменения частоты, фазных напряжения, линейных токов при работе РКТ тип. Toshiba Aquilion 16 slice CT выпуска 2007 г.

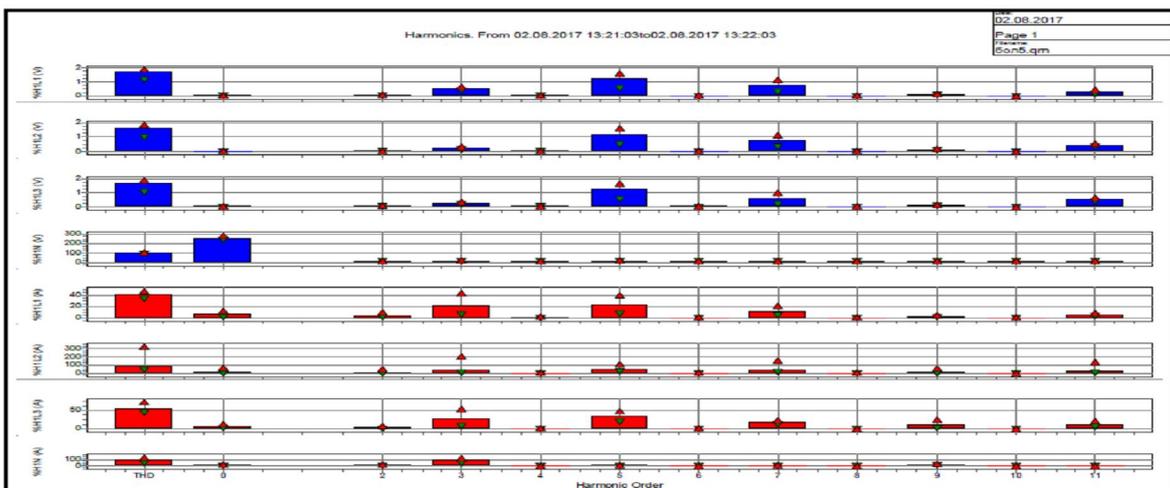
Результаты измерений величин ПКЭ исследованных объектов приведены в табл. 1.



а)



б)



в)

Рис. 2 – Осциллограммы изменения параметров ПКЭ питающей сети и параметров РКТ: а – график изменения частоты напряжения на клеммах РКТ РКТ тип. Toshiba Aquilion 16 slice CT выпуска 2007 г.; б – графики изменения линейных токов и фазных напряжений на РКТ; в – график частотных составляющих кривых токов и напряжений на клеммах РКТ

Таблица 1

Суточные изменения ПКЭ в точках замеров

Наименование узла исследования	Отклонение напряжения		Отклонение частоты, Гц	Коэффициент несинусоидальности $K_{исУ}$, %
	В	%		
РКТ тип. Toshiba Aquilion 16 slice CT выпуска, 2007г.	+8	+3,6	-0,012	0,8
	-6	-2,7	+0,037	
РКТ: модель TSX-031 Alexion 16, паспорт № ПТ-148-2012	+12	+5,45	-0,012	0,71
	-9	-4,1	+0,019	
шины КТП – 2-400кВа, 6/0,4 кВ	+5,5	+2,5	+0,013	0,74
	-4,8	-2,18	-0,012	
МРТ: тип Hitachi AIRISVento, 2007г.	+2	+0,9	+0,011	0,68
	-3	-1,36	-0,017	

Результаты измерения показывают, что ПКЭ в точках подключения диагностического оборудования имеют отклонения от номинальных значений, которые не превышают значения допустимых величин, нормируемых ГОСТ 13109-97. Отклонение режимных параметров напряжения в сети приводят к изменению уровня и формы кривой напряжения, и тем самым величины скоростной характеристики фронта напряжения. Для установления разброса числовых значений скоростной характеристики при изменяющихся ПКЭ в сети необходимо получить зависимости скорости изменения фронта от изменения отклонения, частоты и высших гармонических составляющих напряжения. Характер нагрузки бытовых потребителей не имеет ярко выраженных колебательных процессов, длительность переходного процесса изменения напряжения составляют менее 0,1 секунды, поэтому оценку скоростной характеристики изменения фронта напряжения произведём как для стационарного режима электропотребления.

Скорость изменения фронта напряжения определяется выражением

$$V_f = \frac{U_{m2} - U_{m1}}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

где U_{m1} , U_{m2} – значения мгновенных напряжений в точках 1 и 2; t_1 , t_2 – значения времени в точках 1 и 2.

Принимая за начало отсчёта нулевое значение мгновенной составляющей напряжения и шаг дискретизации равным 1 мкс, скорость изменения фронта напряжения при частоте равной 50 Гц определится выражением:

$$V_f = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_2) - U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_1) = U_m \cdot \sin 18^\circ = 0.309 \cdot U_m, \quad (3)$$

где U_m – максимальное значение напряжения; ω – угловая скорость.

Скорость изменения фронта напряжения линейно зависит от мгновенного значения напряжения при фиксированном шаге времени опроса. На рис. 3 приведен график изменения скоростной характеристики от изменения уровня амплитудного значения напряжения.

Значения скоростной характеристики изменения фронта напряжения позволяют определить нормальные и аварийные зоны работы РКТ при изменении уровней напряжения сети. Установление границ зон позволяет диагностировать аварийные режимы в питающей сети.

Использование скоростной характеристики в цифровых устройствах защиты невозможно без учёта коэффициента трансформации напряжения, поэтому выражение (3) имеет вид:

$$V_f = \frac{0,309 \cdot U_m}{\kappa_{mp}}, \quad (4)$$

где κ_{mp} – коэффициент кратности преобразования мгновенного значения напряжения.

Обязательным условием применения скоростной характеристики изменения фронта кривой напряжения для диагностики режима питающей сети и защиты трёхфазного потребителя является изменения знака мгновенного значения линейного напряжения и равенство его величины нулевому значению. При контроле скорости изменения трех линейных напряжений выявление аномального режима сети происходит за 6,66 мкс, что в три раза увеличивает чувствительность системы диагностики и защиты РКТ.

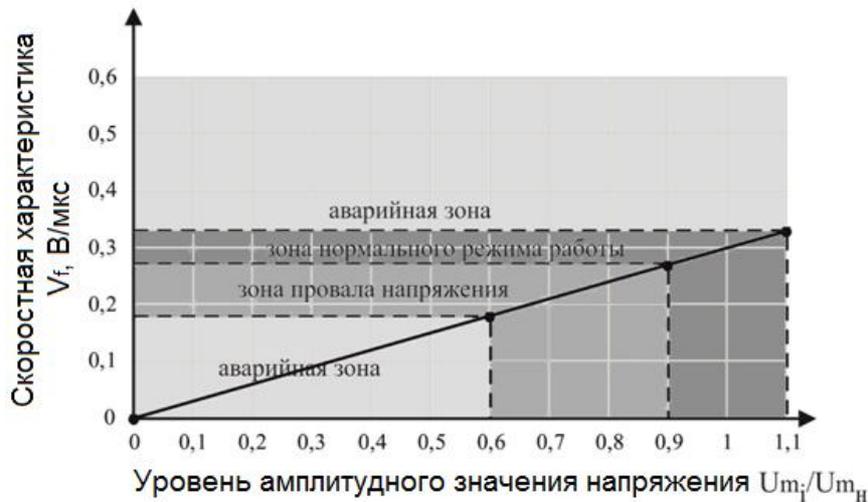


Рис. 3 – График изменение скоростной характеристики от изменения уровня амплитудного значения напряжения

Для однофазного потребителя, такого как МРТ, время выявления аварийного режима сети равно шагу опроса.

Изменение величины скорости фронта напряжения от шага дискретизации времени опроса для частоты сети, равной 50 Гц, определится выражением:

$$V_f = \frac{U_m}{K_{mp}} \sin(\Delta H \cdot 18^\circ), \quad (5)$$

где ΔH – шаг дискретизации времени опроса, изменяется от 0,5 до 2,5, то есть в первой четверти положительной полуволны.

В таблице 2 приведены числовые значения скорости изменения фронта напряжения для различных значений уровня амплитудного напряжения и шага времени опроса. Величина амплитуды напряжения трёхфазной системы – $U_m = 535,8$ В.

Таблица 2

Числовые значения скорости изменения фронта напряжения для различных значений уровня напряжения и шага времени опроса

ΔH	V_f	U_n	$0,9 \cdot U_n$	$1,1 \cdot U_n$	$0,6 \cdot U_n$
		В/мкс	В/мкс	В/мкс	В/мкс
1,0		165,6	149,0	182,1	99,36
1,5		243,3	218,9	267,6	146,0
2,0		315,0	283,5	346,5	189,3
2,5		378,8	149,0	417,7	227,3

На рис. 4 приведены графики изменения скорости фронта напряжения для различных значения шага опроса и уровней амплитуды напряжения.

Результаты, приведенные в табл. 2 и на рис. 4, показывают: при увеличении величины шага опроса разностные показатели скорости изменения фронта кривой напряжения для различных значений мгновенного значения напряжения увеличиваются, что позволяет при увеличении шага дискретизации увеличить допустимое значение порога, определяющего переход скоростной характеристики из одной режимной зоны в другую.

С изменением частоты в питающей сети величина периода синусоиды будет изменяться. С изменением величины периода изменится и величина мгновенного значения напряжения в точке опроса. Относительная величина мгновенного значения напряжения при изменении частоты относительно номинальных величин мгновенного значения напряжения определится выражением:

$$\Delta U_{mi} = U_{mн} \sin(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t) \cdot \left(1 - \frac{\sin(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot t)}{\sin(2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot t)}\right), \quad (6)$$

где ΔU_{mi} – величина абсолютного изменения мгновенного значения напряжения в точке измерения; f_n – номинальное значение частоты сети; f_i – значение частоты сети при наличии ее отклонения.



Рис. 4 – Графики изменения скорости фронта напряжения для различных значений шага опроса амплитуды напряжения

Математические расчёты показали, что отклонение частоты в сети на 1 Гц приводит к изменению мгновенного значения напряжения на 0,7%, при отклонении частоты на 0,4 Гц изменение мгновенного значения составит 0,2%. Для исключения влияния изменения частоты на скоростную характеристику при определении значения перехода скоростной характеристики из одной режимной зоны в другую необходимо установить значение величины порога $\pm \Delta V_f$ не более 1%.

Аналитическое выражение для определения скорости изменения фронта напряжения при наличии высших гармонических составляющих с использованием преобразований Фурье является громоздким и требует учёта изменяющихся значений частоты и амплитуды частотных составляющих, характер изменения которых является случайным процессам.

Оценку предела изменения скорости изменения фронта напряжения проведём графоаналитическим методом, позволяющим с 5% погрешностью получить оценочный результат. На рис. 5 приведены осциллограммы форм кривых напряжения, имеющих различные значения коэффициентов несинусоидальности, амплитудных значений гармонических напряжений и различный спектр частот [9].

В таблице 3 приведен диапазон изменения скорости фронта напряжений для амплитудного значения синусоидального напряжения, равном $U_{mн} = 535,8 В$, шаге дискретизации $\Delta H = 1$ и различных значениях коэффициентов несинусоидальности $K_{нс}$.

Результаты графоаналитического анализа показывают, что разброс показателей скорости изменения фронта напряжения составляет более 120% для одних и тех же значений амплитуды напряжения и шага дискретизации. Использование скоростных характеристик изменения фронта для диагностирования режима сети, имеющего высшие гармонические составляющие, возможно только при использовании мгновенного значения первой гармонической составляющей. Для выделения первой гармонической составляющей необходимо установить пассивные фильтры параллельно цепи измерения. Резонансная частота фильтров определяется наличием в сети спектра высших гармонических составляющих. Количество используемых фильтров и их добротность определяется величиной порогового значения перехода скоростной характеристики из одной режимной зоны в другую, которая не должна превышать 1%.

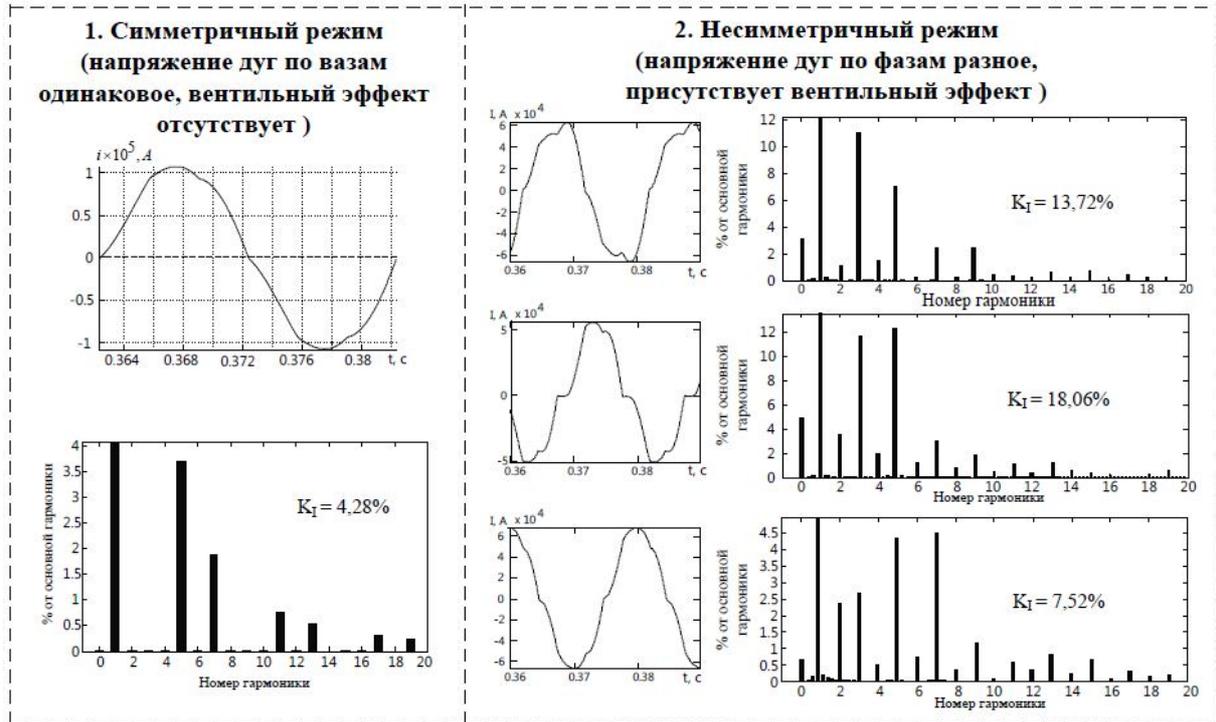


Рис. 5 – Кривые синусоидального напряжения, имеющие различные значения коэффициентов несинусоидальности и различный спектр частот

Таблица 3

Диапазон изменения скорости фронта напряжений

№ кривой	V_f , В/мкс	ΔV_f , В/мкс	δV_f , %
Кривая 1 $K_{нс} = 4,28\%$	107,2	58,4	35,9
Кривая 2 $K_{нс} = 13,2\%$	428,6	257,0	56,0
Кривая 3 $K_{нс} = 18,09\%$	212,4	46,8	28,0
Кривая 4 $K_{нс} = 7,52\%$	361,2	195,6	118,0

Выводы

1. Использование скоростной характеристики изменения фронта напряжения позволяет повысить в три раза быстрдействие выявления аварийных режимов питающей сети.
2. Величина скоростной характеристики позволила установить пределы режимных зон работы РКТ при нормальных и аварийных режимах в питающей сети.
3. Изменение частоты сети, в пределах величины нормируемой ГОСТ 13109-97, приводит к изменению скорости изменения фронта напряжения не более, чем на 0,7%, что не оказывает влияния на изменение скоростной характеристики при установлении порога чувствительности перехода скоростной характеристики из одной зоны режима в другую, равному 1%.
4. Высшие гармонические составляющие сети не позволяют использовать скоростную характеристику изменения фронта напряжения в средствах диагностики режимов в питающей сети и защиты РКТ без установки фильтров. Количество фильтров, частоту их настройки и требуемую добротность определяется спектральным составом напряжений и необходимостью обеспечения величины порога чувствительности, перехода скоростной характеристики из одной зоны режима в другую, менее 1%.

Список использованных источников:

1. Комплексная защита рентгеновского компьютерного томографа от нестабильности и провалов питающего напряжения / В.Е. Кривонос [и др.] // Вісник Хмельницького національного університету : Зб. наук. пр. – Хмельницьк, 2017. – Вип. 5. – С. 140-144. – (Серія: Технічні науки).
2. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : Утв. ... 25.07.06, № 258 / М-во топлива и энергетики Украины. – Х. : Издательство «Индустрия», 2007. – 288 с.
3. Инверторные системы – Пульсар Лимитед [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Киев, 2017. – Режим доступа: www.pulsar.kiev.ua/invertorno-akkumulatornaya-sistema. – Название с экрана.
4. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. Т. 1 / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 536 с.
5. Кривонос В.Е. Использование скоростных изменений сопротивления изоляции в диагностических средствах защиты / В.Е. Кривонос, С.М. Злепко, Л.Г. Коваль // Вісник Херсонського національного технічного університету : Зб. наук. пр. – Херсон, 2017. – Вип. № 4. – С. 37-44. – (Серія: Технічні науки).
6. Кривонос В.Е. Статические источники реактивной мощности при диагностике состояния изоляции асинхронных двигателей и питающего кабеля в условиях локальной компенсации / В.Е. Кривонос / Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2016. – Вип. 33. – С. 123-130. – (Серія: Технічні науки).
7. Пат. 101849 Україна, МПК G 01 R 31/34. Спосіб виявлення і розпізнавання дефектів ізоляції електродвигунів, які працюють в агресивних середовищах, і пристрій для його реалізації / В.Є. Кривонос. – № а201104406; заявл. 11.04.11; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9. – 8 с.
8. Пат. 98353 Україна, МПК H 02 K 15/12, G 01 R 31/34. Спосіб контролю зміни опору ізоляції електродвигуна й живильного кабелю / В.Є. Кривонос. – № а201005384; заявл. 05.05.10; опубл. 10.05.12, Бюл. № 9. – 4 с.
9. Повышение эффективности работы сверхмощной дуговой сталеплавильной печи за счет использования системы диагностики стадий плавки по высшим гармоникам токов дуг / А.А. Николаев [и др.] // Технические науки – от теории к практике : сб. ст. по матер. XXVII междунар. науч.-практ. конф. – № 10 (23). – Новосибирск : СибАК, 2013. – С. 115-131.

References:

1. Krivonosov V.E., Zlepko S.M., Pavlov S.V., Azarkhov A.Yu., Baranovsky D.B. Kompleksnaia zashchita rentgenovskogo komp'iuternogo tomografa ot nestabil'nosti i provalov pitaiushchego napriazheniia [Integrated protection of X-ray computer tomography from instability and power supply failures]. *Visnik Khmel'nits'kogo natsional'nogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Herald of Khmelnytskyi national university. Technical Sciences*, 2017, no.5, pp. 140-144. (Rus.)
2. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelei* [Rules of technical operation of electrical installations of consumers]. Kiev, 2007, 288 p. (Rus.)
3. *Invertornye sistemy – Pul'sar Limited* (Inverter systems – Pulsar Limited) Available at: www.pulsar.kiev.ua/invertorno-akkumulatornaya-sistema (accessed 15 May 2017).
4. Neumann L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering]. Leningrad, Energoizdat Publ. 1981. 536 p. (Rus.)
5. Krivonosov V.E., Zlepko S.M., Koval L.G. Ispol'zovanie skorostnykh izmenenii soprotivleniia izoliatsii v diagnosticheskikh sredstvakh zashchity [Use of high-speed changes in isolation resistance in diagnostic means of protection], *Visnik Kherson'skogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Bulletin Kherson national technical university. Technical Sciences*, 2017, no.4, pp. 37-44. (Rus.)
6. Krivonosov V.E. Sticheskie istochniki reaktivnoi moshchnosti pri diagnostike sostoianiia izoliatsii asinkhronnykh dvigatelei i pitaiushchego kabelia v usloviakh lokal'noi kompensatsii [Static sources of reactive power in diagnostics of isolation of asynchronous motors and power supply cables in the conditions of local compensation]. *Visnik Priazov'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Serii: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2016, iss. 33, pp. 123-130. (Rus.)
7. Krivonosov V.E. *Sposib viiavlennia i rozpiznavannia defektiv izoliatsii elektrodvигuniv, iaki prat-*

- siuiut' v agresivnikh seredovishchakh, i pristirii dlia iogo realizatsii* [A method for detecting and recognizing insulation defects of electric motors operating in aggressive environments, and a device for its implementation]. Patent UA, no.101849, 2013. (Ukr.)
8. Krivonosov V.E. *Sposib kontroliu zmini oporu izoliatsii elektrodiviguna i zhivil'nogo kabeliu* [A method for controlling the change in insulation resistance of an electric motor and a power cable]. Patent UA, no.98353, 2012. (Ukr.)
 9. Nikolaev A.A., Anufriev A.V., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A. *Povyshenie effektivnosti raboty sverkhmoshchnoi dugovoi staleplavil'noi pechi za schet ispol'zovaniia sistemy diagnostiki stadii plavki po vysshim garmonikam tokov dug. Sbornik statei 27 Mizhn. nauk.-prakt. konf. «Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike»* [Increase of efficiency of work of super-power arc steel-making furnace due to use of system of diagnostics of stages of melting on the higher harmonics of currents of arcs. The collection of articles of 27th Int. Sci.-Pract. Conf. «Engineering – from theory to practice»]. Novosibirsk, 2013, pp. 115-131. (Rus.)

Рецензент: А.Ю. Азархов
д-р мед. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.10.2017

УДК 621.341.572

© Бурлака В.В.¹, Гулаков С.В.², Поднебенная С.К.³, Скосырев В.Г.⁴

АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Целью работы является анализ процессов в системе беспроводной передачи энергии с использованием низкочастотных магнитных полей, выполненной с применением резонансного воздушного трансформатора, и разработка подходов к повышению эффективности работы таких систем. Выполнена оценка режима работы по основной гармонике системы беспроводной передачи энергии с настроенной в резонанс передающей катушкой. Показано, что необходимым условием максимальной мощности в приемнике является не только настройка в резонанс приемной катушки, но и нагружение приемного контура на строго определенное активное нагрузочное сопротивление, зависящее от коэффициента связи между передающей и приемной катушками. Выполнена оценка максимальной передаваемой мощности, определены требования к выпрямителю приемника, при выполнении которых возможна работа с максимальной мощностью в нагрузке. Предложено применить в приемнике активный выпрямитель с соответствующей специализированной системой управления, обеспечивающей работу с алгоритмом поиска точки максимальной мощности MPPT (Maximum Power Point Tracking) и точную подстройку приемного контура в резонанс в реальном времени за счет управления фазовым сдвигом между напряжением и током. Использование предлагаемого подхода в системах беспроводной зарядки аккумуляторов позволит повысить эффективность их работы и уменьшить время заряда.

Ключевые слова: *беспроводная передача энергии, беспроводная зарядка, воздушный трансформатор, резонансный трансформатор.*

¹ канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр., ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, VladimirV.Burlaka@gmail.com

² д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gulakov_s_v@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, докторант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, podsvet@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь