

УДК 621. 379.087.9

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ АССИМЕТРИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ НА КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Барщевский Евгений Георгиевич

кандидат технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота

им. адмирала С.О. Макарова»

г. Санкт-Петербург, Россия

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения экономической эффективности и режимной безопасности функционирования судовых электроэнергетических систем путем улучшения качества электроэнергии. Одним из направлений решения данного вопроса является оценка влияния потребителей электрической энергии на качество напряжения. Цель исследования: выработка рекомендаций по повышению качества электрической энергии. В статье рассмотрены вопросы влияния электрической асимметрии в цепи ротора асинхронного двигателя на качество напряжения в судовой электроэнергетической системе. Показаны причины возникновения электрической асимметрии в цепи ротора асинхронного двигателя в зависимости от типа конструкции последнего. Рассмотрено как асимметрия сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя, создавая несимметричную систему токов, влияет на качество напряжения в судовой электроэнергетической системе. Выведено выражение для результирующего напряжения судовой электроэнергетической системы, проведен анализ и оценка каждой составляющей результирующего напряжения. Предложено упрощенное аналитическое выражение напряжения биения, которое по своему воздействию на судовую нагрузку близко к амплитудно-частотно-модулированному напряжению. Показано что, напряжение биения при любых соотношениях амплитуд и частот суммируемых напряжений не будет модулированным только по амплитуде или только по частоте. Определено, что коэффициенты, характеризующие колебания напряжения по амплитуде и частоте, зависят от амплитуд и частот суммируемых напряжений. Из проведенного в статье анализа можно сделать вывод, что электрическая и магнитная асимметрия в цепи ротора асинхронного электродвигателя приводит к биениям напряжения в судовой электроэнергетической системе.

Ключевые слова. Качество напряжения, асинхронные двигатели, судовая электроэнергетическая система, электрическая асимметрия, биения напряжения, амплитудно-частотно-модулированное напряжение.

Введение (Introduction). В последние годы в судостроении происходили достаточно быстрые и радикальные изменения, связанные с совершенствованием и применением гребных электрических установок, в которых электроэнергетические системы строятся как единые, обеспечивающие питанием и гребные электрические установки, и общесудовые потребители [9], с широким внедрением на судах средств автоматизации, вычислительной техники, электроники, значительного спектра электротехнического оборудования. Все это предопределяет непрерывный рост требований к качеству электрической энергии [1; 7].

Качество электроэнергии в судовой элек-

троэнергетической системе влияет на механические, тепловые [2], светотехнические, виброакустические и другие характеристики потребителей [6; 8]. При этом особенно чувствительны к качеству электроэнергии средства вычислительной техники, радиоэлектронная аппаратура, обеспечивающая гидроакустику, навигацию и радиосвязь [3; 4]. Огромное влияние на качество электроэнергии в электроэнергетической системе оказывают потребители электрической энергии [5].

В судовой электроэнергетической системе основной нагрузкой является асинхронная [9]. Конструктивно судовые асинхронные электродвигатели могут выполняться как с корот-

козамкнутым, так и с фазным ротором. Независимо от конструкции в той или иной степени асинхронным двигателям присуща электрическая асимметрия цепи ротора. В литературе рассмотрено влияние асинхронных двигателей на качество напряжения в зависимости от установленной мощности [4; 5], режимов работы [1; 9], конструкции электродвигателей [1], однако влияние асимметрии сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя на качество напряжения в судовой электроэнергетической системе не рассматривалось.

В статье рассмотрены следующие вопросы: причины возникновения электрической и магнитной асимметрии сопротивлений цепи ротора, рассмотрено влияние асимметрии сопротивлений в цепи ротора асинхронного двигателя на качество напряжения в судовой электрической системе, показано, что электрическая и магнитная асимметрия цепи ротора приводят к биениям напряжения в судовой электроэнергетической системе. Выведено упрощенное аналитическое выражение напряжения биений, даны рекомендации по использованию асинхронных двигателей в специальных сетях с чувствительными к колебаниям напряжения сети потребителями.

Методы и материалы (Methods and Materials). Асимметрия сопротивлений в цепи ротора может быть вызвана неодинаковым нажатием щеток или ухудшением переходных контактов между кольцами и щетками в двигателе с фазным ротором, а также обрывом одной из фаз. У короткозамкнутых асинхронных электродвигателей асимметрия в цепи ротора может явиться следствием плохих контактов или разрывов между стержнями и короткозамкнутыми кольцами, пустот в стержнях и т. д.

При неравенстве сопротивлений фаз ротора в них возникает несимметричная система токов с частотой $f_2 = sf_1$, которую можно разложить на симметричные составляющие прямой и обратной последовательности.

Прямое поле ротора вращается синхронно с полем статора и создает в обмотках статора э.д.с., имеющую частоту тока сети f_1 . Обратное поле ротора при угловой скорости вращения ротора, превышающей половину скорости вращения поля статора, вращается в ту же сторону, что и поле статора, и индуцирует

в статоре э.д.с. частоты $f_2 = (1 - 2s)f_1$.

В судовой электроэнергетической системе, у асинхронного электродвигателя с несимметричным ротором, помимо э. д. с. основной частоты f_1 , будет э. д. с. $f_2 = (1 - 2s)f_1$, таким образом, на напряжение судовой электроэнергетической системы $u_1 = U_{m1}\sin\omega_0 t$ наложится напряжение $u_3 = U_{m3}(t)\sin\omega_2 t$.

В результате в судовой электроэнергетической системе выражение для результирующего напряжения будет выглядеть следующим образом:

$$u_\sigma = U_{m\sigma}(t)\sin(\omega_0 + \varphi) \quad (1)$$

где:

$$U_{m\sigma}(t) = \sqrt{U_{m1}^2 + U_{m3}^2 + 2U_{m1}U_{m3}\cos\omega_\sigma t}; \quad (2)$$

$$\frac{U_{m3}}{U_{m1}} \ll 1;$$

φ – фазовый угол;

Из выражения (2) видно, что амплитуда $U_{m\sigma}(t)$ является функцией времени. Ее колебание будем оценивать коэффициентом паразитного амплитудного биения напряжений, равным отношению амплитуд суммируемых напряжений, т. е.:

$$k_{v\sigma} = \pm \frac{U_{m3}}{U_{m1}} \quad (3)$$

Так как в судовых электроэнергетических системах при электрической и магнитной асимметрии ротора асинхронного электродвигателя $U_{m3} \ll U_{m1}$, то $k_{v\sigma} \ll 1$, тогда выражение (2) можно записать следующим образом:

$$U_{m\sigma}(t) = U_{m1}(1 + k_{v\sigma}\cos\omega_\sigma t) \quad (4)$$

Выражение (4) аналогично выражению для амплитуды при паразитной амплитудной модуляции напряжения.

При этом под паразитной модуляцией напряжения будем понимать относительно малые изменения во времени его амплитуды и частоты. Модуляции напряжения в судовых сетях при одиночной работе генераторных агрегатов являются следствием пульсаций результирующего потока и колебаний скорости вращения генератора переменного тока, возникающих по различным причинам. При этом возмущающие факторы, возбуждающие модуляции напряжения в судовых сетях находятся как в источниках электроэнергии – генераторных агрегатах, так и в нагрузке, которую они питают. Модуляцию напряжения, обусловлен-

ную только пульсацией результирующего потока, будем называть паразитной амплитудной модуляцией напряжения.

Модуляцию напряжения, обусловленную неравномерной скоростью вращения генератора, будем называть паразитной частотной модуляцией напряжения.

Модуляцию напряжения, обусловленную неравномерной скоростью вращения при постоянном или пульсирующем потоке генератора, будем называть паразитной амплитудно-частотной модуляцией напряжения.

Огибающая амплитуд $U_{m\sigma}(t)$ близка к синусоиде, поэтому ее трудно отличить от огибающей амплитудно-модулированного напряжения при гармонической пульсации результирующего потока генератора.

Биения и паразитная амплитудная модуляция, несмотря на аналогичность математических выражений амплитуд напряжения (при принятых допущениях) различны по природе их происхождения.

Частота биения F_σ не равна ни одной из частот слагаемых напряжений (ни f_1 , ни f_3), а равна их разности:

$$F_\sigma = |f_1 - f_3| = 2f_{1s}$$

Фазовый угол $\varphi(t)$ является функцией времени. При $U_{m3} \ll U_{m1}$ можно приближенно принять $U_{m1} + U_{m3}\cos\omega_\sigma t \approx U_{m1}$ и, следовательно, допустить, что $tg(\varphi) \approx \varphi$. После принятых допущений

$$\varphi(t) \approx k_{v\sigma}\sin\omega_\sigma t$$

Из этого выражения видно, что коэффициент $k_{v\sigma}$ численно равен индексу паразитной амплитудной модуляции напряжения, т. е.

$$k_{v\sigma} = \beta_\sigma$$

Максимальное отклонение частоты биения напряжений:

$$\Delta f_{\sigma max} = \beta_\sigma F_\sigma = \frac{U_{m3}}{U_{m1}} F_\sigma = \frac{U_{m3}}{U_{m1}} (f_3 - f_1) \quad (5)$$

Упрощенное аналитическое выражение напряжения биений имеет вид:

$$u = U_{m1}(1 - k_{v\sigma}\cos\omega_\sigma t)\sin(\omega_0 t + \beta_\sigma\sin\omega_\sigma t) \quad (6)$$

Из этого выражения видно, что напряжение биения имеет амплитуду и фазу изменяющиеся по гармоническому закону с одинаковой частотой.

По своему воздействию на нагрузку напряжение биения будет близко к амплитудно-частотно-модулированному напряжению, причем при любых соотношениях амплитуд и ча-

стот суммируемых напряжений напряжение биения не будет модулированным только по амплитуде или только по частоте.

Коэффициенты, характеризующие колебания напряжения по амплитуде и частоте, зависят от амплитуд и частот суммируемых напряжений. Так, например, в судовых электро-энергетических системах нормальной частоты имеют место колебания напряжения судовой сети, обусловленные электрической и магнитной асимметрией в цепях ротора асинхронного двигателя по амплитуде $k_{v\sigma} = (0.1 \div 0.2)\%$ с частотой $F_\sigma = (0.85 \div 23)$ гц, а в специальных сетях повышенной частоты $k_{v\sigma} = (0.1 \div 0.5)\%$ и $F_\sigma (2 \div 110)$ гц,

Если в сети имеют место колебания напряжения с частотой $F_\sigma = 2sf_1$, то вероятной причиной этих колебаний является асимметрия сопротивлений фаз ротора. Отметим, что по известным значениям F_σ и f_1 можно определить скольжение асинхронного двигателя.

Выводы (Summary). На основании анализа конструктивных особенностей асинхронных электрических двигателей выявлены причины, приводящие к появлению асимметрии сопротивлений в цепи роторов короткозамкнутой и фазной конструкций. Теоретические исследования, что электрическая и магнитная асимметрии в цепи ротора асинхронного электродвигателя приводит к биениям напряжения в судовой электроэнергетической системе. Выведено упрощенное аналитическое выражение напряжения биения, позволяющее оценить характер воздействия напряжения биений на нагрузку.

Определено, что коэффициенты, характеризующие колебания напряжения по амплитуде и частоте, зависят от амплитуд и частот суммируемых напряжений.

Качество напряжения при этом можно оценить коэффициентом $k_{v\sigma}$, индексом β_σ и частотой и F_σ .

Анализ показал, что в специальных сетях, от которых питаются чувствительные к колебаниям напряжения потребители, нежелательно было бы иметь асинхронную нагрузку, особенно асинхронные электродвигатели с фазным ротором, так как их использование приводит к снижению качества электроэнергии в судовой сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барцевский Е.Г.* Влияние высших гармоник на качество электроэнергии и оборудование электрической системы // Сб. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. молод. учен., студен. и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте» (Санкт-Петербург, апрель 2019) – СПб.: «ЮПИ», 2019. – С. 44-49.
2. *Барцевский Е.Г.* Идентификация коэффициента искажения кривой напряжения электроэнергетических систем буровой установки со статическими выпрямителями. // Сб. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. молод. учен., студен. и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте» (Санкт-Петербург, апрель 2019). – СПб.: «ЮПИ», 2019. – С. 49-56.
3. *Барцевский Е.Г.* Контроль качества электроэнергии. // Сб. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. молод. учен. студен. и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте» (Санкт-Петербург, апрель 2019). – СПб.: «ЮПИ», 2019. – С. 62-66.
4. *Батрак Д.В., Калинин И.М., Кузнецов В.И., Сеньков А.П.* Оценка качества напряжения питания в судовой электроэнергетической системе методом компьютерного моделирования // Электротехника. – 2017. – № 12. – С. 18-24.
5. *Волошко А.В., Харчук А.Л.* К вопросу мониторинга качества электрической энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 3. – С. 76-85.
6. *Родимов Н.В.* Анализ систем повышения качества электрической энергии при активной фильтрации гармонических искажений сети // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2015. – № 2(30). – С. 198-207. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2198-207.
7. *Руди Д.Ю.* Проблема качества электроэнергии судовых электроэнергетических систем // Омский научный вестник. – 2018. – № 3(159). – С. 40-43. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-40-43.
8. *Суслов К.В., Солонина Н.Н., Герасимов Д.О.* Современные подходы к оценке качества электрической энергии / К.В. Суслов, Н.Н. Солонина, Д.О. Герасимов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19. – № 7-8. – С. 85-93.
9. *Ясаков Г.С. Дмитриев Б.Ф. Калмыков А.Н., Лебедев А.Н.* Методы повышения качества электроэнергии в единых судовых электроэнергетических системах // Электротехника. – 2017. – № 12. – С. 3-7.

UDC 621. 379.087.9

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ELECTRICAL AND MAGNETIC ASYMMETRY IN AN ELECTRIC MACHINE ON THE QUALITY OF VOLTAGE IN THE SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEM

BARSHCHEVSKY Evgeny Georgievich

PhD in Technical Sciences, Professor

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

St. Petersburg, Russia

The relevance of the work is due to the need to improve the economic efficiency and operational safety of the ship's electric power systems by improving the quality of electricity. One of the ways to solve this issue is to assess the impact of electricity consumers on the quality of voltage. Objective: to develop recommendations for improving the quality of electricity. The article deals with the influence of electrical asymmetry in the rotor circuit of an asynchronous motor on the quality of the voltage in the ship's electric power system. The causes of electrical asymmetry in the rotor circuit of an asynchronous motor are shown depending on the type of construction of the latter. It is considered as the asymmetry of the resistances in the rotor circuit of the induction motor, creating an asymmetrical system of currents, affects the quality of the voltage in the ship's electrical system. The expression for the resulting voltage of the ship's electric power system is derived, the analysis and evaluation of each component of the resulting voltage is carried out. A simplified analytical expression of the run-out voltage, which in its effect on the ship's load is close to the amplitude-frequency-modulated voltage, is proposed. It is shown that the pulse voltage at any ratio of amplitudes and frequencies of the summed voltages will not be modulated only in amplitude or only in frequency. It is determined that the coefficients characterizing the voltage oscillations in amplitude and frequency depend on the amplitudes and frequencies of the summed voltages. From the analysis carried out in the article, it can be concluded that the electrical and magnetic asymmetry in the rotor circuit of an asynchronous electric motor leads to voltage beats in the ship's electric power system.

Key words: the quality of the voltage, induction motors, marine electric system, electrical unbalance, run-out voltage, the amplitude-frequency-modulated voltage, parasitic amplitude modulation.
