

УДК 62-97/-98

UDC 62-97/-98

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ПОЛУЧЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СТАТИЧЕСКИХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В  
КООРДИНАТАХ ОБОБЩЕННОГО  
ВЕКТОРА**

**RECEIVING FREQUENCY CHARACTERISTICS  
OF STATIC ELEMENTS OF ELECTRICAL  
POWER NETWORK IN THE GENERALIZED  
VECTOR SPACE**

Коробейников Борис Андреевич  
д.т.н., профессор  
РИНЦ SPIN-код=8653-3962  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
технологический университет», Краснодар,  
Россия*

Korobeinikov Boris Andreevich  
Dr.Sci.Tech., professor  
RSCI SPIN-code=8653-3962  
*FGBOU VO «Kuban State Technological University»,  
Krasnodar, Russia*

Оппаходжаев Алишер Максудович  
ассистент  
РИНЦ SPIN-код=2380-5233  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
технологический университет», Краснодар,  
Россия*

Oppakhodzhaev Alisher Maksudovich  
assistant  
RSCI SPIN-code=2380-5233  
*FGBOU VO «Kuban State Technological University»,  
Krasnodar, Russia*

Сидоров Дмитрий Игоревич  
к.т.н., доцент  
РИНЦ SPIN-код=1741-8208  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
технологический университет», Краснодар,  
Россия*

Sidorov Dmitriy Igorevich  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
RSCI SPIN-code=1741-8208  
*FGBOU VO «Kuban State Technological University»,  
Krasnodar, Russia*

Шевченко Жанна Ивановна  
к.т.н., доцент  
*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный  
технологический университет», Краснодар,  
Россия*

Shevchenko Zhanna Ivanovna  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*FGBOU VO «Kuban State Technological University»,  
Krasnodar, Russia*

Статья посвящена решению одной из важнейших задач в электроэнергетике, заключающейся в упрощении и повышении точности моделирования и расчета режимов сложных электрических комплексов с использованием частотных характеристик элементов энергосистемы в координатах обобщенного вектора. Материал статьи имеет исследовательский характер, выражающийся в том, что математические модели статических элементов электрической сети рассмотрены в виде передаточных функций зависимости проводимости от частоты сети. Ряд положений статьи обладает научной новизной, заключающейся в подходе к выбору системы координат для моделирования статических элементов. Предложены математические модели воздушных и кабельных линий электропередачи, обобщенной нагрузки, одиночных реакторов в системе координат обобщенного вектора для анализа установившихся и переходных режимов

The article is devoted to solving one of the major problems in electric power industry, which is to simplify and improve the accuracy of simulation and calculation modes of complex electrical systems with using the frequency characteristics of the elements of the power system in generalized vector space. Article has an exploratory character, which is expressed that mathematical models of static elements of an electrical network are considered in the form of transfer functions of dependence of conduction on the frequency. A number of the provisions of article has scientific originality which is in the approach to the choice of the coordinate system for modeling static elements. It is offered the mathematical models air and cable transmission lines, generalized load, single reactors generalized vector space for analysis of steady and transient modes. As an example was calculated family of real and imaginary parts of the frequency characteristics of the AC-70 line with different values of the length, lines with different section (AC-70, AC-95, AC-120), generalized load with different ratios of

их работы. В качестве примера рассчитаны семейства действительной и мнимой части частотной характеристики линии АС-70 при различных значениях длины, линий разного сечения (АС-70, АС-95, АС-120), обобщенной нагрузки при различных соотношениях активной и реактивной мощностей, различных типов одиночных реакторов. Предлагаемые математические модели позволяют при помощи более эффективного математического аппарата исследовать различные симметричные режимы работы электрических сетей

active and reactive power, various types of single reactors. Offered mathematical models allow exploring different symmetric modes of electric networks using more efficient mathematical apparatus

Ключевые слова: ЭНЕРГОСИСТЕМА, КООРДИНАТЫ ОБОБЩЕННОГО ВЕКТОРА, МАТРИЦА, ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Keywords: POWER SUPPLY SYSTEM, GENERALIZED VECTOR SPACE, MATRIX, FREQUENCY CHARACTERISTIC

**Doi: 10.21515/1990-4665-128-037**

Анализ переходных процессов в сложных электрических сетях, содержащих различные элементы, нуждается в совершенствовании алгоритмов расчетов и математических моделей. Дифференциальные уравнения для сложных электрических сетей являются, как правило, жесткими и требуют значительного времени для их решения. Совершенствования расчетов переходных процессов на основе частотных методов представляют интерес в том, что основные вычислительные операции являются алгебраическими, что упрощает расчеты. Однако моделирование трехфазных элементов в частотной области является сложным, и это затрудняет их применение. Переход к представлению элементов электрических сетей в координатах обобщенного вектора значительно упрощает их модели в частотной области

В данной статье рассматриваются модели статических элементов электрических сетей (воздушные и кабельные линии, статическая нагрузка, одиночный реактор) и производится анализ их частотных характеристик в координатах обобщенного вектора.

Под обобщенным вектором следует понимать вектор, проекции которого на оси фазных векторов в любой момент времени равны

мгновенным значениям представляемых этим вектором фазных величин (рисунок 1).

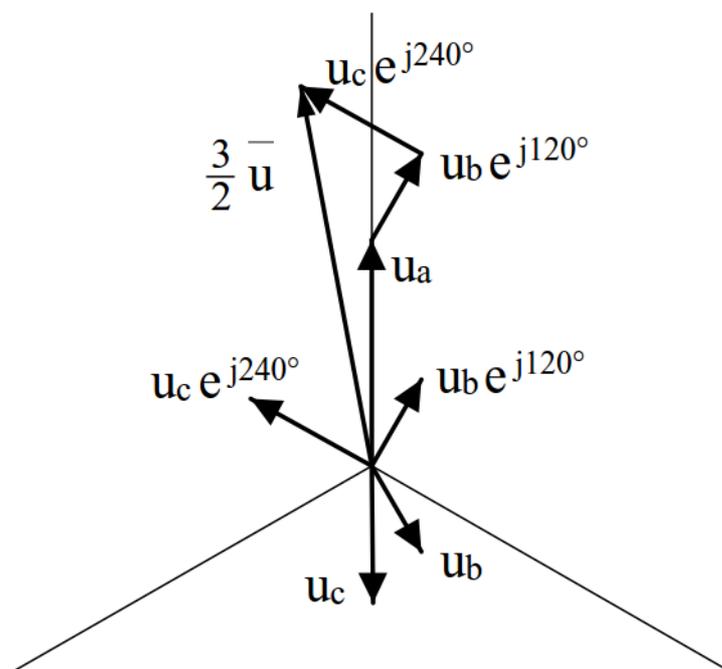


Рисунок 1 – Получение обобщенного вектора напряжений

Переход от фазной системы координат, к координатам обобщенного вектора осуществляется по следующей формуле [1]:

$$u_f = \frac{2}{3(u_a + a \cdot u_b + a^2 \cdot u_c)}, \quad (1)$$

где  $u_a, u_b, u_c$  - векторы напряжений в фазах;

$u_f$  – обобщенный вектор напряжений;

$a = e^{j120^\circ}$  - оператор трехфазной системы

Схема воздушной и кабельной линий в фазной системе координат приведена на рисунке 2.

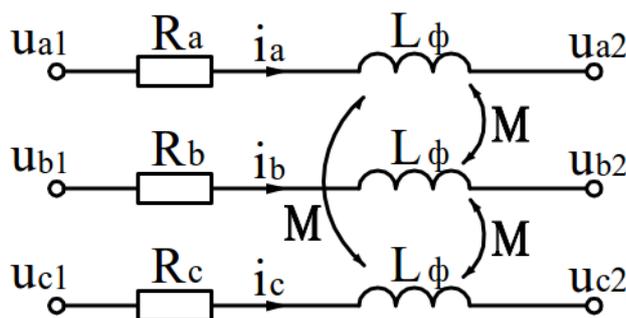


Рисунок 2 – Схема замещения линии электропередачи в фазной системе координат

Уравнение для линии в матричной форме:

$$\vec{u}_1 - \vec{u}_2 = \vec{R} \cdot \vec{i} + \vec{L} \cdot \frac{d\vec{i}}{dt}, \quad (2)$$

где  $\vec{u}_1 = |u_{a1} \ u_{b1} \ u_{c1}|^t$ ;

$$\vec{u}_2 = |u_{a2} \ u_{b2} \ u_{c2}|^t;$$

$$\vec{i} = |i_a \ i_b \ i_c|^t;$$

$$\vec{R} = \begin{vmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{vmatrix};$$

$$\vec{L} = \begin{vmatrix} L_\phi & M & M \\ M & L_\phi & M \\ M & M & L_\phi \end{vmatrix}.$$

Применяя выражение (1) к уравнению (2) можно получить более простое уравнение (3) для линии в координатах обобщенного вектора.

$$u_{f1} - u_{f2} = R \cdot i_f + L \cdot \frac{di_f}{dt} + E_z, \quad (3)$$

где  $\omega_s$  – угловая частота электрической сети;

$$L = L_\phi - M;$$

$$E_z = j\omega_s L \cdot i_f.$$

Схема линии в координатах обобщенного вектора приведена на рисунке 3.

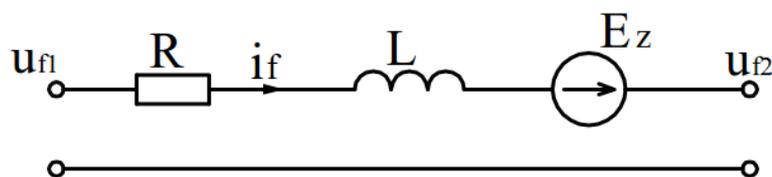


Рисунок 3 – Схема замещения линии электропередачи при переходе к системе координат обобщенного вектора

Если применить преобразование Фурье [3] к выражению (3), то уравнение в частотной области следующее.

$$u_{f1}(j\omega) - u_{f2}(j\omega) = [R + j(\omega + \omega_s) \cdot L] \cdot i_f.$$

Тогда частотная характеристика для линии электропередачи следующая:

$$W(j\omega) = \frac{1}{R + j(\omega + \omega_s) \cdot L}. \quad (4)$$

На рисунках 4, 5, 6, 7 приведены частотные характеристики для различных воздушных линий электропередачи в зависимости от длины и сечения проводов.

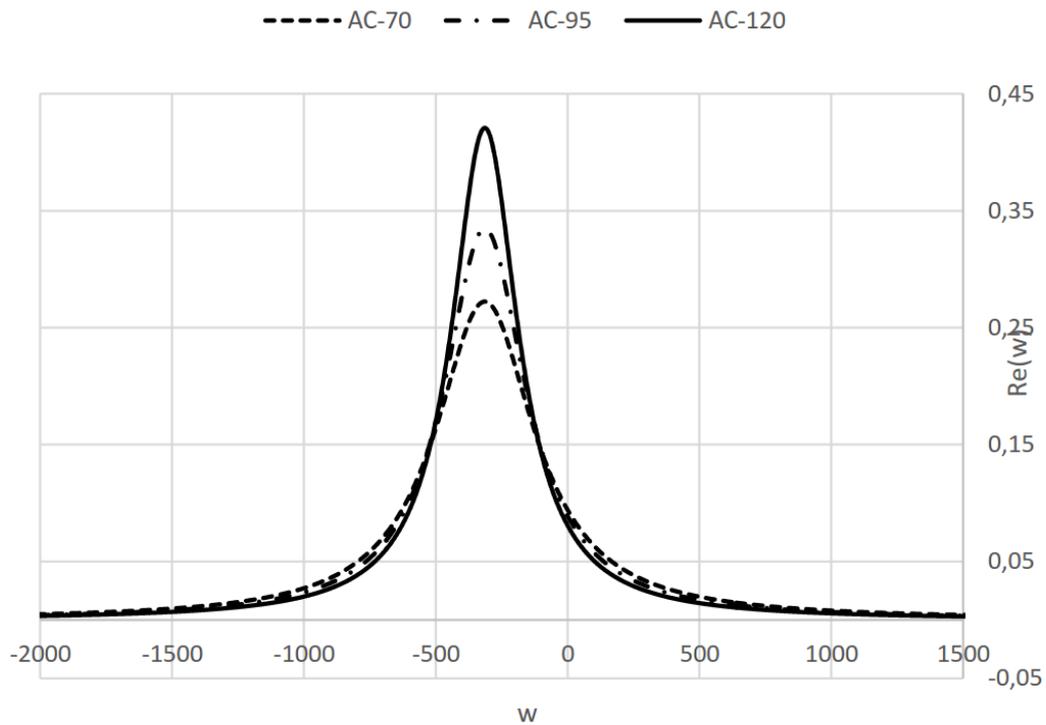


Рисунок 4 – Действительная составляющая частотной характеристики линий электропередачи разных сечений

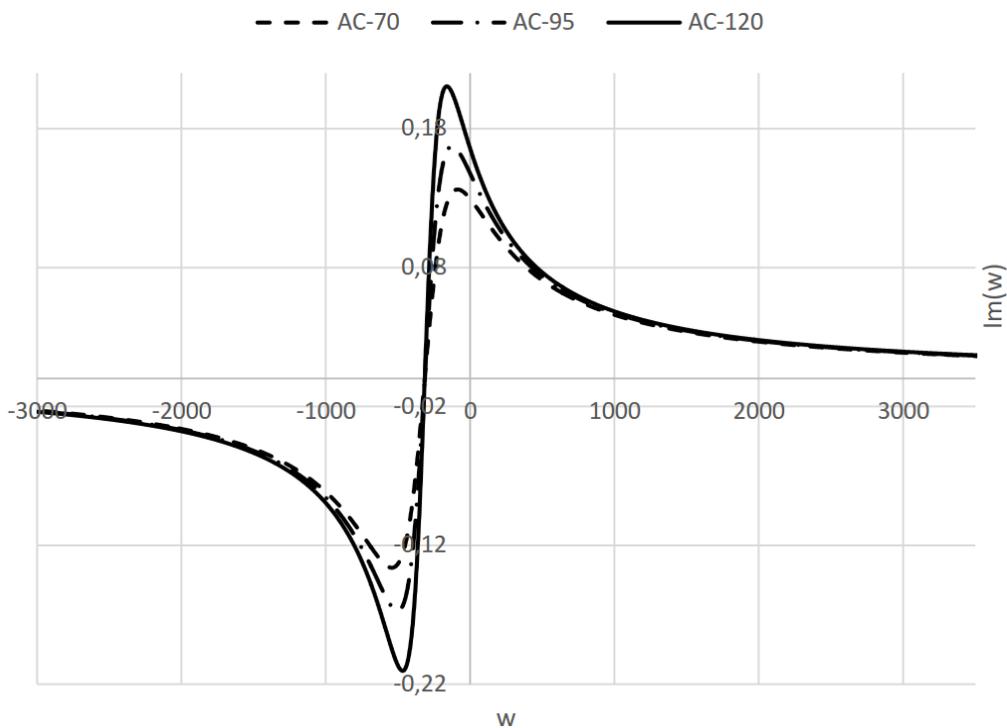


Рисунок 5 – Мнимая составляющая частотной характеристики линий электропередачи разных сечений

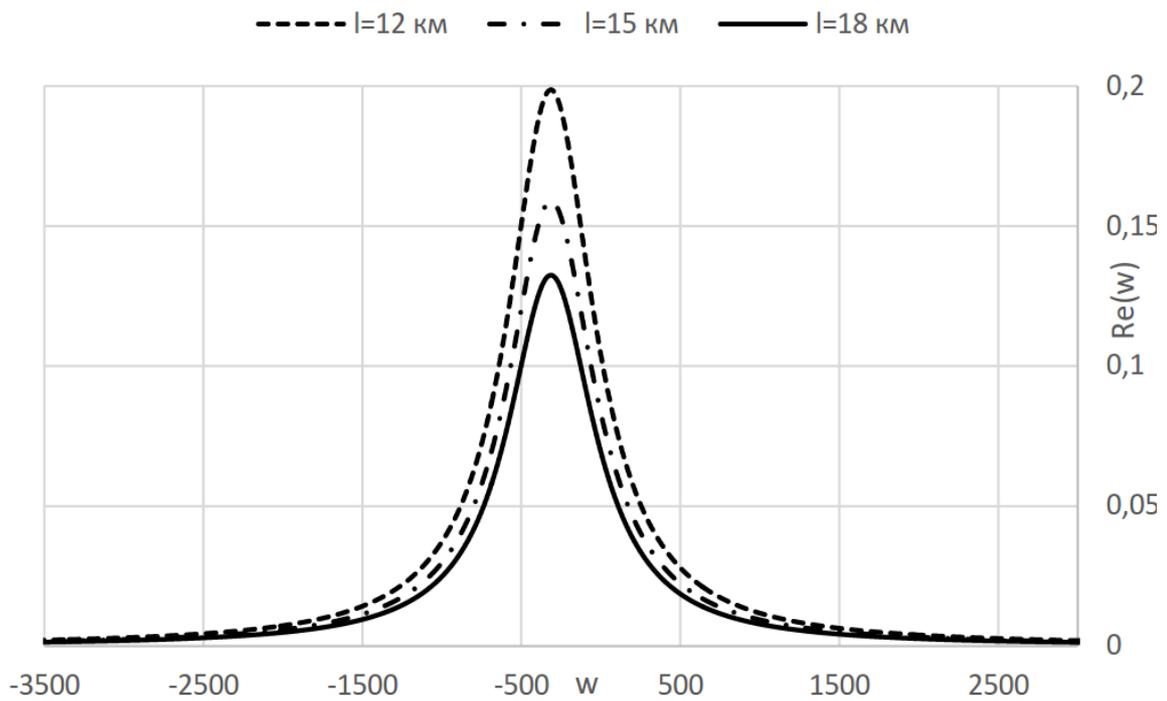


Рисунок 6 – Действительная составляющая частотной характеристики линии АС-70 при изменении ее длины

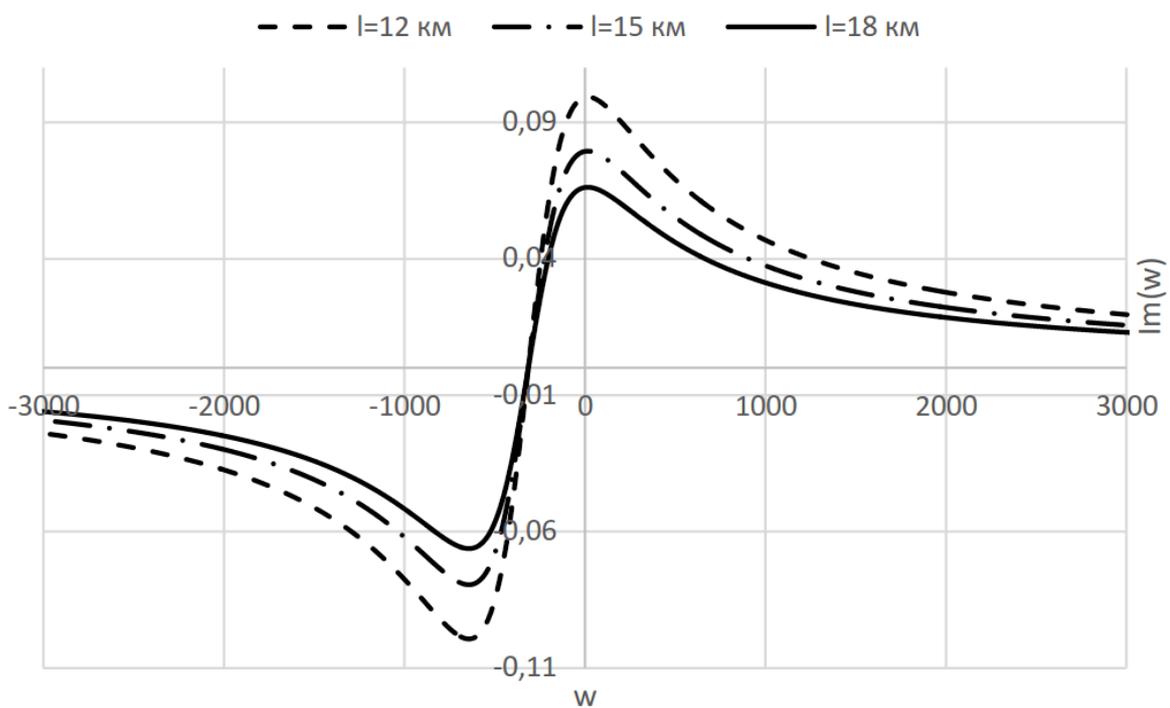


Рисунок 7 – Мнимая составляющая частотной характеристики линии АС-70 при изменении ее длины

Схема статической нагрузки в фазной системе координат приведена на рисунке 8.

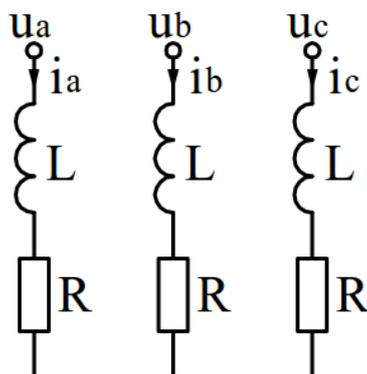


Рисунок 8 – Схема замещения статической нагрузки в фазной системе координат

Уравнение в матричной форме для статической нагрузки следующее:

$$\vec{u} = \vec{R} \cdot \vec{i} + \vec{L} \cdot \frac{d\vec{i}}{dt},$$

где  $\vec{u} = |u_{a1} \ u_{b1} \ u_{c1}|^t;$

$$\vec{i} = |i_a \ i_b \ i_c|^t;$$

$$\vec{R} = \begin{vmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{vmatrix};$$

$$\vec{L} = \begin{vmatrix} L_{\Phi} & 0 & 0 \\ 0 & L_{\Phi} & 0 \\ 0 & 0 & L_{\Phi} \end{vmatrix}.$$

Переходя к системе координат обобщенного вектора и применяя преобразование Фурье, можно получить схему статической нагрузки (рисунок 9) и ее частотную характеристику согласно выражению (4).

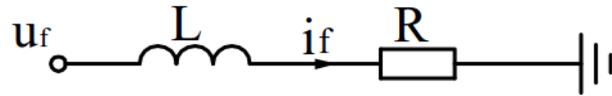


Рисунок 9 – Схема замещения статической нагрузки при переходе к системе координат обобщенного вектора

Параметры схемы R, L для статической нагрузки определяются, исходя из заданных значений активной и реактивной мощности  $P_H$  и  $Q_H$  как

$$R = \frac{P_H}{3 \cdot I_H^2}; \quad I_H = \frac{P_H}{\cos(\varphi) \cdot \sqrt{3} \cdot U_H};$$

$$L = \frac{Q}{3 \cdot I_H^2 \cdot \omega_s}; \quad Q_H = P_H \cdot \tan(\varphi).$$

На рисунках 10, 11, 12, 13 приведены частотные характеристики статической нагрузки для различной мощности и коэффициента мощности  $\cos\varphi$ .

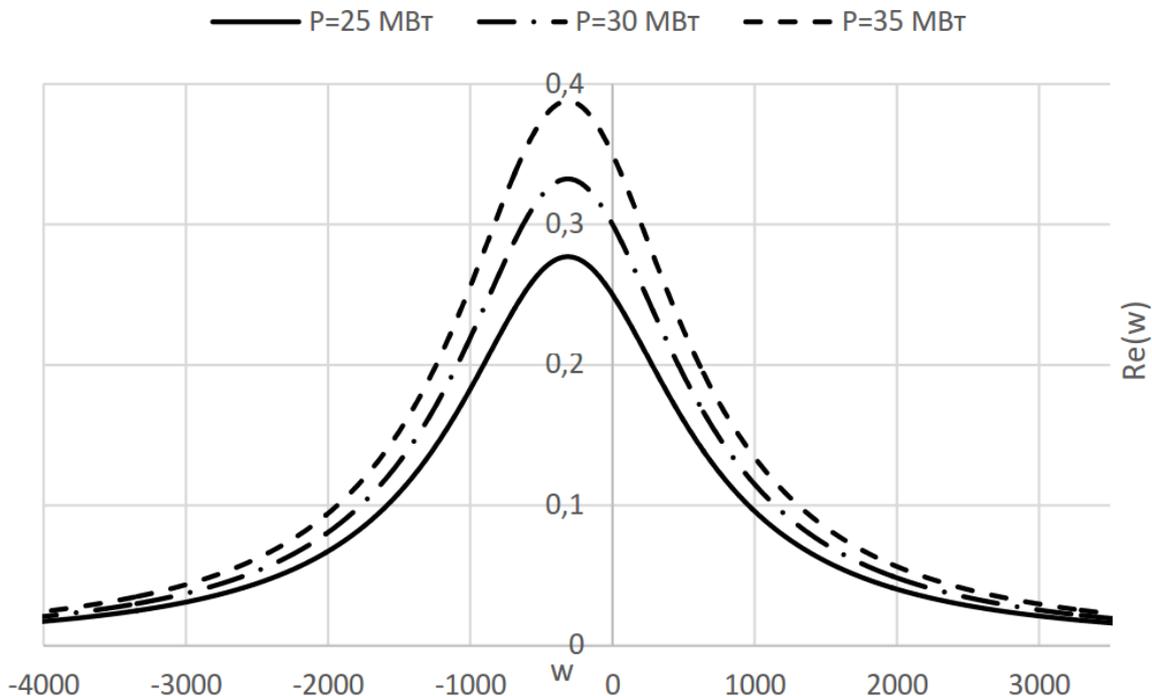


Рисунок 10 – Действительная составляющая частотной характеристики различных нагрузок при одинаковом соотношении P и Q

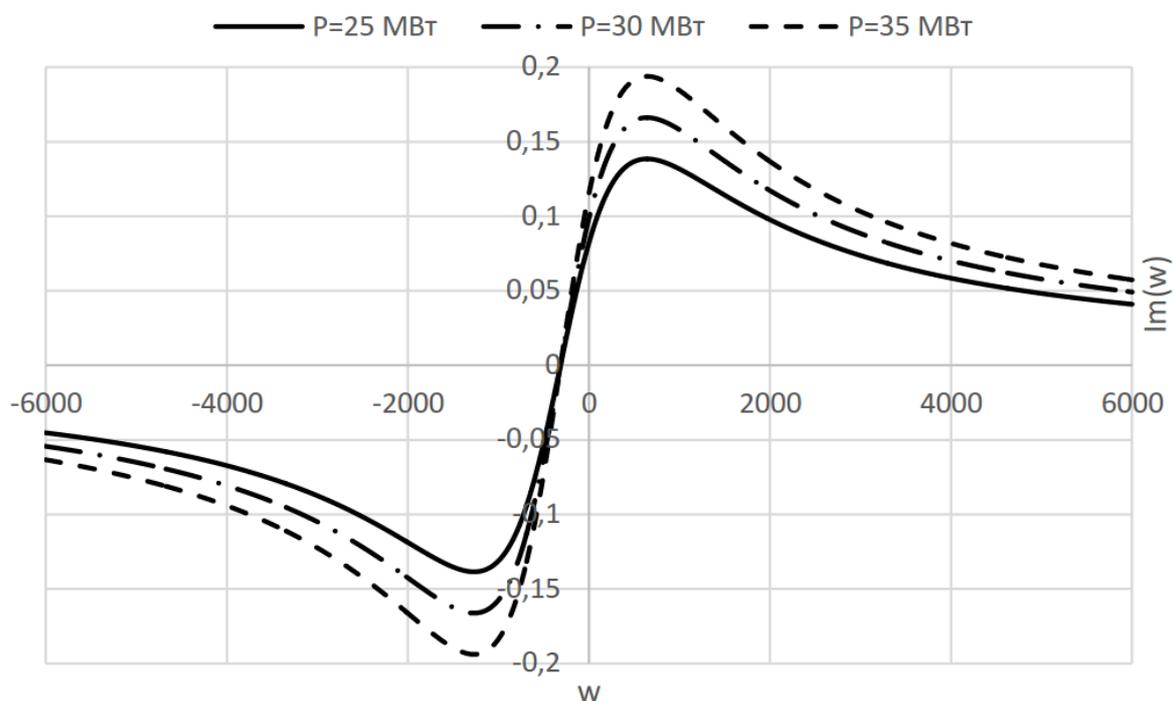


Рисунок 11 – Мнимая составляющая частотной характеристики Различных нагрузок при одинаковом соотношении Р и Q

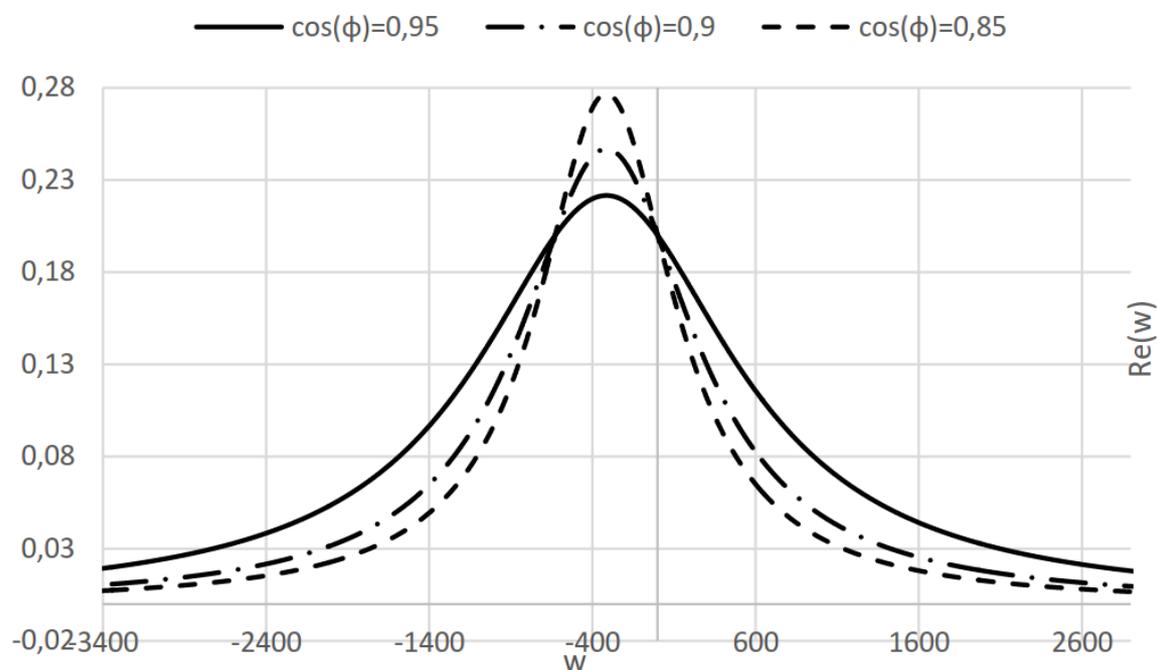


Рисунок 12 – Действительная составляющая частотной характеристики нагрузки 20 MWt при различных коэффициентах мощности

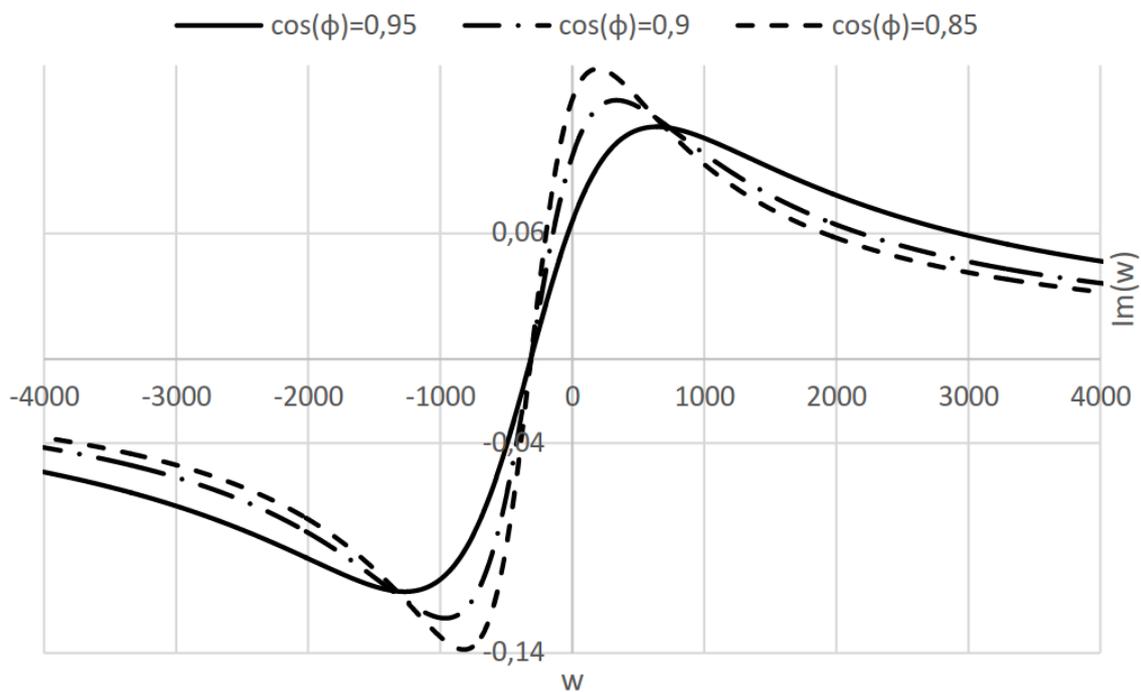


Рисунок 13 – Мнимая составляющая частотной характеристики нагрузки 20 МВт при различных коэффициентах мощности

Для одиночного реактора выражение для частотной характеристики такое же, как и для линии, и схема в координатах обобщенного вектора соответствует рисунку 3.

На рисунках 14, 15 приведены частотные характеристики для различных реакторов.

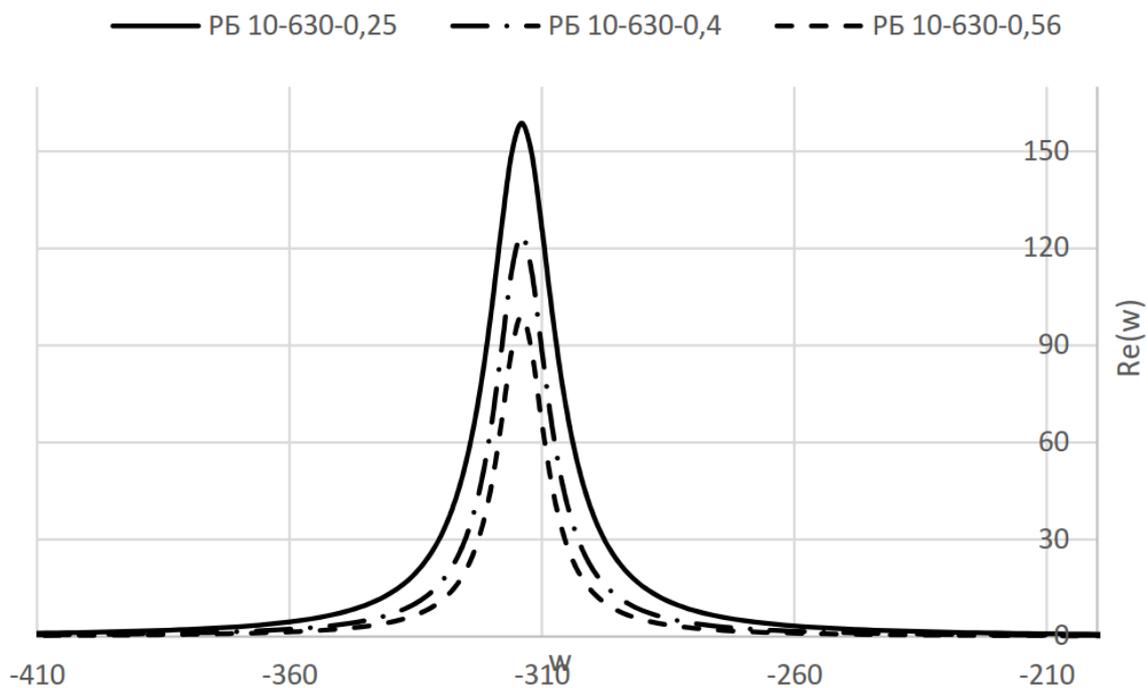


Рисунок 14 – Действительная составляющая частотной характеристики различных типов реакторов

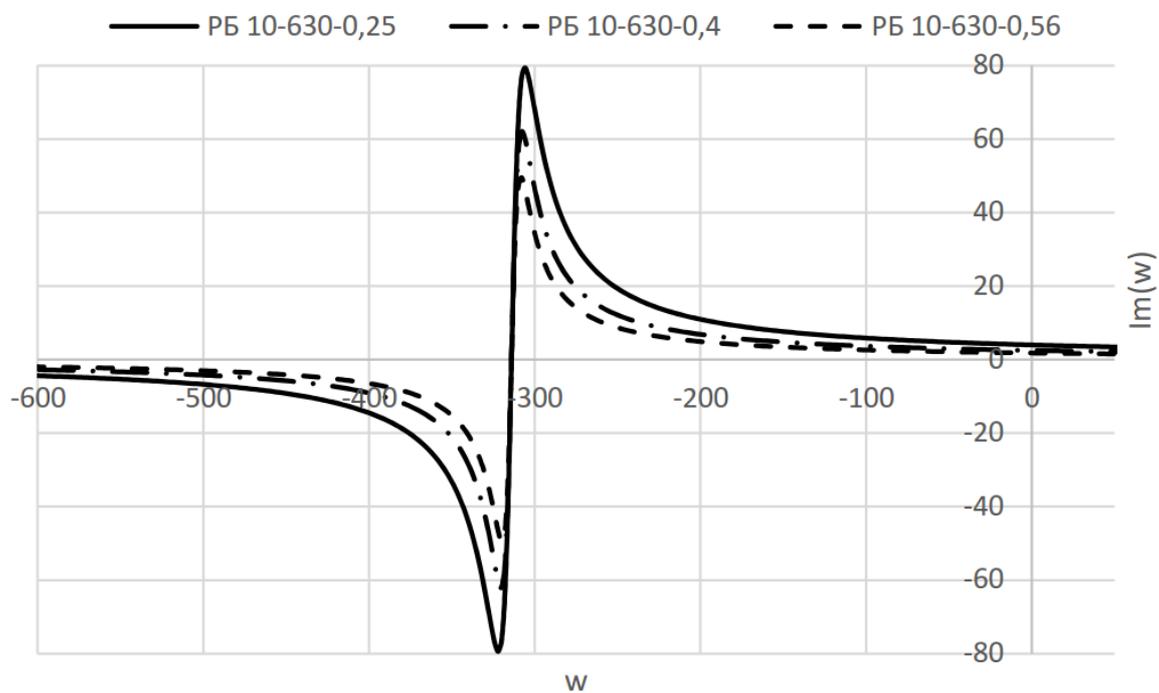


Рисунок 15 – Мнимая составляющая частотной характеристики различных типов реакторов

Анализ частотных характеристик линий, статической нагрузки и реакторов показывает, что для действительной и мнимой частей этих характеристик существуют общие закономерности. Функции являются монотонными и имеют в частотной области конечную энергию спектра.

Так как частотные характеристики получены на основе дифференциальных уравнений элементов электрических сетей, то они могут быть использованы для решения задач, связанных с анализом переходных процессов.

### Список литературы

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования /Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. - М.: Энергоатомиздат, 1991. 494 с.
3. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с.

### References

1. Kovach K.P., Rac I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka. – M.-L.: Gosjenergoizdat, 1963. – 744 s.
2. Spravochnik po proyektirovaniyu elektricheskikh setey i elektrooborudovaniya /Pod red. Y.G. Barybina i dr. - M.: Energoatomizdat, 1991. 494 s.
3. Vlach J, Singhal K. Mashinnye metody analiza i proektirovaniya ehlektronnyh skhem. – M.: Radio i svyaz', 1988. – 560 s.