

УДК 621.311.001.57

UDC 621.311.001.57

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБОКОПАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ САХАРНЫХ ЗАВОДОВ

MODELING DEEP BAR INDUCTION MOTORS FOR SUGAR FACTORY ELECTRICAL POWER SUPPLY SYSTEMS

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

Ищенко Алексей Ильич
к.т.н., доцент
РИНЦ SPIN-код=1879-6380
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия

Ishchenko Aleksey Ijich
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code=1879-6380
FGBOU VO «Kuban State Technological University», Krasnodar, Russia

Смаглиев Александр Михайлович
к.т.н., доцент
РИНЦ SPIN-код=4549-4736
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», Краснодар, Россия

Smagliev Aleksandr Mihailovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code=4549-4736
FGBOU VO «Kuban State Technological University», Krasnodar, Russia

Ольшанская Ирина Владимировна
к.т.н., доцент
РИНЦ SPIN-код=9953-6900
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

Olshanskaya Irina Vladimirovna
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code=9953-6900
FGAOU VO «Sevastopol State University», Sevastopol, Russia

Статья посвящена решению актуальной задачи, заключающейся в повышении точности моделирования переходных режимов работы систем электро-снабжения сахарных заводов. Материал статьи имеет исследовательский характер, выражающийся в том, что исследованы различные математические модели, предназначенные для анализа симметричных режимов работы глубокопазных асинхронных двигателей. Ряд положений статьи обладает научной новизной, заключающейся в подходе к выбору системы координат для моделирования глубокопазных асинхронных двигателей. Сформулированы требования к методу анализа переходных процессов для глубокопазных асинхронных двигателей. Предложены математические модели высоковольтных асинхронных двигателей в различных системах координат для анализа установившихся и переходных режимов их работы. На основе двухконтурной модели ротора асинхронного двигателя получено аналитическое выражение для частотной характеристики глубокопазного асинхронного двигателя. В качестве примера рассчитаны действительная и мнимая части частотной характеристики глубокопазного асинхронного двигателя типа 2АЗМ-2000 при скольжении $s = 1$. Предлагаемые математические модели асинхронных двигателей позволяют при помощи более эффективного математического

The article is devoted to solving the urgent task, which is improving the accuracy of transient simulation modes of power supply systems of sugar factories. The material of the article is exploratory in nature, manifested in the fact that we have studied various mathematical models designed for the analysis of symmetric modes of deep bar induction motors. A number of the provisions of article have scientific novelty, which lies in the approach to the choice of the coordinate system for modeling deep bar induction motors. We have formulated the requirements for transient analysis method for deep bar induction motor. We have developed the mathematical models of high-voltage induction motors in different coordinate systems for the analysis of steady-state and transient modes of operation. Based on double-circuit rotor model of induction motor, an analytical expression for the frequency characteristic of the deep bar induction motor is obtained. As an example, we have calculated and presented real and imaginary parts of the frequency characteristic of the induction motor type 2AZM-2000 with slip $s = 1$. The mathematical models of induction motors allow using mathematical apparatus more efficiently to explore different symmetrical modes of engines. The study proposed to use transients in the power supply systems of sugar factories for the analysis. The authors suggest an approach to modeling, which can also be useful for mod-

аппарата исследовать различные симметричные режимы работы двигателей. Результаты исследования предлагается использовать для анализа переходных процессов в системах электроснабжения сахарных заводов. Предлагаемый авторами подход к моделированию может быть полезен и при моделировании асинхронных генераторов

eling induction generators

Ключевые слова: ГЛУБОКОПАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, КООРДИНАТЫ ОБОБЩЕННОГО ВЕКТОРА, МАТРИЦА, МНОГОКОНТУРНАЯ МОДЕЛЬ, ОБМОТКА, РОТОР, СИНХРОННАЯ УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ, СКОЛЬЖЕНИЕ, СТАТОР, ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Keywords: DEEP BAR INDUCTION MOTOR, GENERALIZED VECTOR SPACE, MATRIX, MULTI-LOOP MODEL, WINDING, ROTOR, SYNCHRONOUS ANGULAR VELOCITY, SLIP, STATOR, FREQUENCY CHARACTERISTIC

Doi: 10.21515/1990-4665-122-044

Анализ состава электрических нагрузок сахарных заводов показал, что около 70 % потребителей электрической энергии составляют асинхронные двигатели. От полноты представления моделей асинхронных двигателей и точности представления их параметров зависит точность расчетов режимов в системах электроснабжения. При этом математическую модель асинхронного двигателя целесообразно представить в виде электрической цепи, которая бы легко сочеталась с математическими моделями других элементов систем электроснабжения [1, 2].

Для глубокопазных асинхронных двигателей с целью улучшения пусковых характеристик используются пазы на роторе прямоугольной, колбообразной, трапецеидальной и других более сложных форм, применение которых значительно усложняет модель асинхронного двигателя. Наиболее предпочтительной в этом случае является линейная многоконтурная модель в виде электрической цепи [2].

Для получения математических моделей глубокопазных асинхронных двигателей принимаются следующие допущения:

- потерями в стали пренебрегаем, явление гистерезиса не учитываем;
- считаем, что потоки рассеяния не зависят от положения ротора;
- пренебрегаем пространственными высшими гармониками;

- считаем, что активные сопротивления обмоток не зависят от температуры;

- не учитываем влияние емкостей внутри обмоток и между ними.

Большое значение для удобства представления модели асинхронного двигателя имеют системы координат. Практически применяются следующие системы координат: *abc* (фазные), *dq* (вращающиеся с ротором машины), *DQ* (синхронно вращающиеся), *F* (обобщенного вектора) и другие [3].

Между различными системами координат существует однозначная связь, определяемая следующими матричными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \vec{U} &= \check{C}_s^t \cdot \vec{U}_n; \\ \vec{I} &= \check{C}_s \cdot \vec{I}_n; \\ \vec{Z}_n &= \check{C}_s^t \cdot \vec{Z} \cdot \check{C}_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\vec{I}_n, \vec{U}_n, \vec{Z}_n$ – преобразованные матрицы токов, напряжений и сопротивлений;

$\vec{I}, \vec{U}, \vec{Z}$ - исходные матрицы токов, напряжений и сопротивлений;

\check{C}_s - матрица преобразований.

При переходе от фазной системы координат к синхронно вращающимся координатам матрица преобразований равна

$$\check{C}_{abc}^{DQ} = \frac{2}{3} \cdot \begin{vmatrix} \cos(\omega_s t + \gamma_0) & \cos(\omega_s t - 120^\circ + \gamma_0) & \cos(\omega_s t + 120^\circ + \gamma_0) \\ \sin(\omega_s t + \gamma_0) & \sin(\omega_s t - 120^\circ + \gamma_0) & \sin(\omega_s t + 120^\circ + \gamma_0) \end{vmatrix} \quad (2)$$

где ω_s – синхронная угловая скорость;

γ_0 – начальный угол между магнитной осью фазы а и ротором двигателя.

Переход от фазной системы координат к координатам обобщенного вектора осуществляется с помощью матрицы [3]:

$$\check{C}_{abc}^F = \frac{2}{3} \cdot e^{-j\omega_s t} \cdot |1 \quad a \quad a^2|, \quad (3)$$

где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$;

$$a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}}.$$

Применяя матричные выражения (1) и (2) можно получить систему дифференциальных уравнений для глубокопазного асинхронного двигателя при представлении его многоконтурной моделью в синхронно вращающейся системе координат:

$$\vec{U}_{DQ} = \check{R}_{DQ} \cdot \vec{I}_{DQ} + \check{L}_{DQ} \cdot \frac{d}{dt} \vec{I}_{DQ} + \omega_s \cdot \check{Q}_{DQ} \cdot \vec{I}_{DQ}, \quad (4)$$

где

$$\vec{U}_{DQ} = \begin{bmatrix} U_D \\ U_Q \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{I}_{DQ} = \begin{bmatrix} i_{Ds} \\ i_{Qs} \\ i_{Dr1} \\ i_{Qr1} \\ \vdots \\ i_{Drn} \\ i_{Qrn} \end{bmatrix};$$

$i_{Dr1}, i_{Qr1}, i_{Dr2}, i_{Qr2}, \dots, i_{Drn}, i_{Qrn}$ – токи обмоток ротора;

$R_{r1}, R_{r2}, \dots, R_{rn}$ – активные сопротивления обмоток ротора;

R_s – активное сопротивление обмотки статора;

L_s – индуктивность обмотки статора;

$L_{r1}, L_{r2}, \dots, L_{rn}$ – индуктивности обмоток ротора;

M – взаимная индуктивность между обмотками;

s – скольжение.

Структура полученных выражений (4) позволяет получить модель глубокопазного асинхронного двигателя в виде электрической цепи с зависимыми источниками, представленную на рисунке 1.

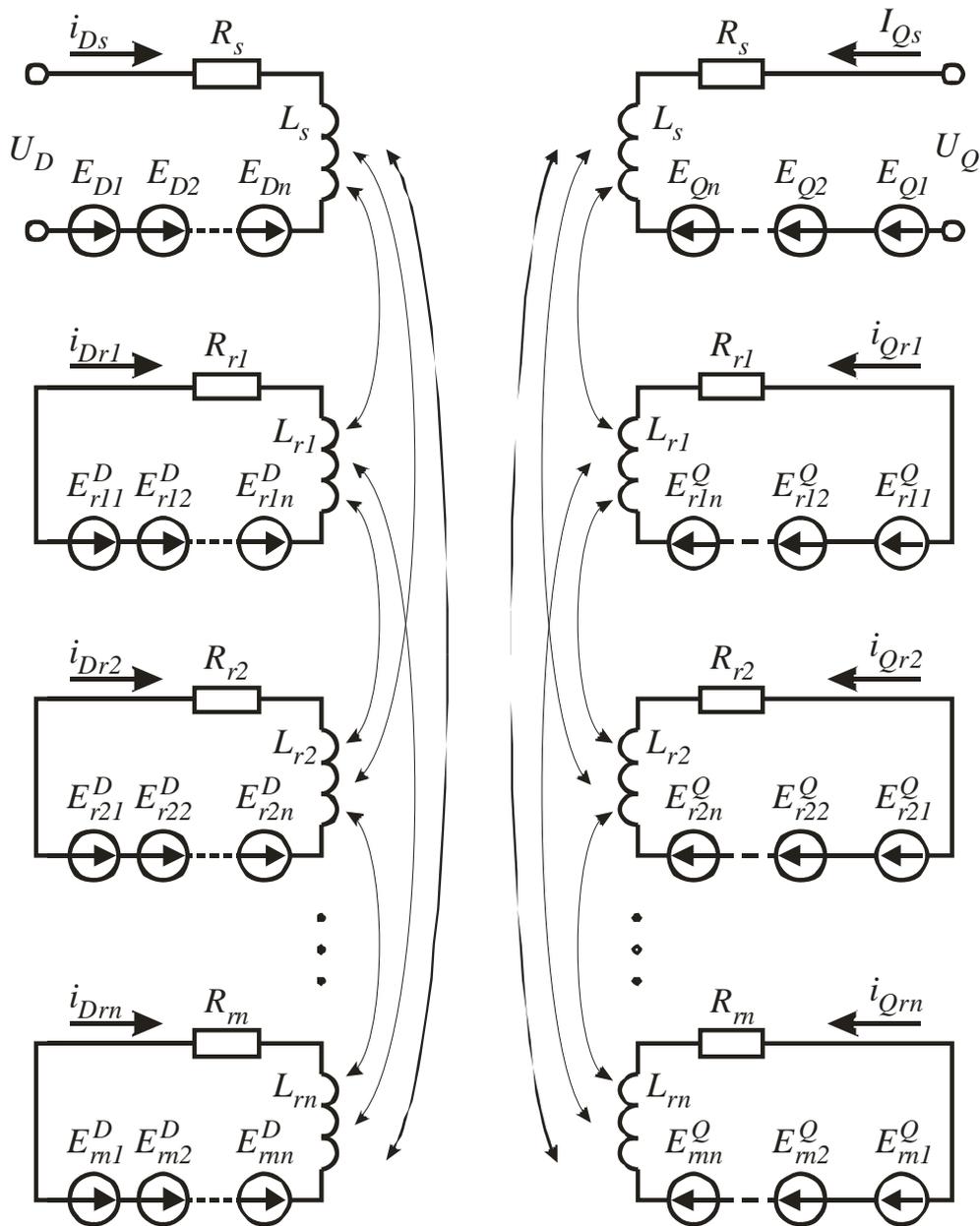


Рисунок 1 – Схема модели глубокопазного асинхронного двигателя для анализа переходных процессов в синхронно вращающихся координатах

В приведенной модели в электрическую цепь введены следующие зависимые источники:

$$E_{D1} = -\omega_s \cdot L_s \cdot i_{Qs}, \quad \dots \quad E_{Dn} = -\omega_s \cdot M \cdot i_{Qrn};$$

$$E_{r11}^D = -s\omega_s \cdot L_{r1} \cdot i_{Qr1}, \quad \dots \quad E_{r1n}^D = -s\omega_s \cdot M \cdot i_{Qrn};$$

$$\begin{aligned}
 E_{Q1} &= \omega_s \cdot L_s \cdot i_{Ds}, & \dots & E_{Qn} = \omega_s \cdot M \cdot i_{Drn}; \\
 E_{r11}^Q &= s\omega_s \cdot L_{r1} \cdot i_{Dr1}, & \dots & E_{r1n}^Q = s\omega_s \cdot M \cdot i_{Drn}; \\
 & \dots & & \dots \\
 E_{rn1}^D &= -s\omega_s \cdot L_{rn} \cdot i_{Qrn}, & \dots & E_{rnn}^D = -s\omega_s \cdot M \cdot i_{Qr(n-1)}; \\
 E_{rn1}^Q &= s\omega_s \cdot L_{rn} \cdot i_{Drn}, & \dots & E_{rnn}^Q = s\omega_s \cdot M \cdot i_{Dr(n-1)}.
 \end{aligned}$$

Зависимые источники ЭДС в цепях статора изменяются в зависимости от токов соответствующих контуров, а зависимые источники в цепях ротора изменяются в зависимости от токов контуров и скольжения двигателя.

Для установившегося режима работы глубокопазного асинхронного двигателя матричное уравнение в синхронно вращающейся системе координат следующее:

$$\vec{U}_{DQY} = \check{R} \cdot \vec{I}_{DQY} + \omega_s \cdot \check{Q}_{DQ} \cdot \vec{I}_{DQY}, \tag{5}$$

где

$$\vec{U}_{DQY} = \begin{pmatrix} U_{Dy} \\ U_{Qy} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \vec{I}_{DQY} = \begin{pmatrix} i_{Dsy} \\ i_{Qsy} \\ i_{Dr1y} \\ i_{Qr1y} \\ \vdots \\ i_{Drny} \\ i_{Qrny} \end{pmatrix}.$$

Схема математической модели асинхронного двигателя, удовлетворяющая матричному выражению (5), приведена на рисунке 2.

Применяя выражения (1) и (3) можно получить систему дифференциальных уравнений в матричной форме для глубокопазного асинхронного

двигателя при представлении его многоконтурной моделью в координатах обобщенного вектора:

$$\vec{U}_F = \check{R}_F \cdot \vec{I}_F + \check{L}_F \cdot \frac{d}{dt} \vec{I}_F + j\omega_s \check{Q}_F \cdot \vec{I}_F, \quad (6)$$

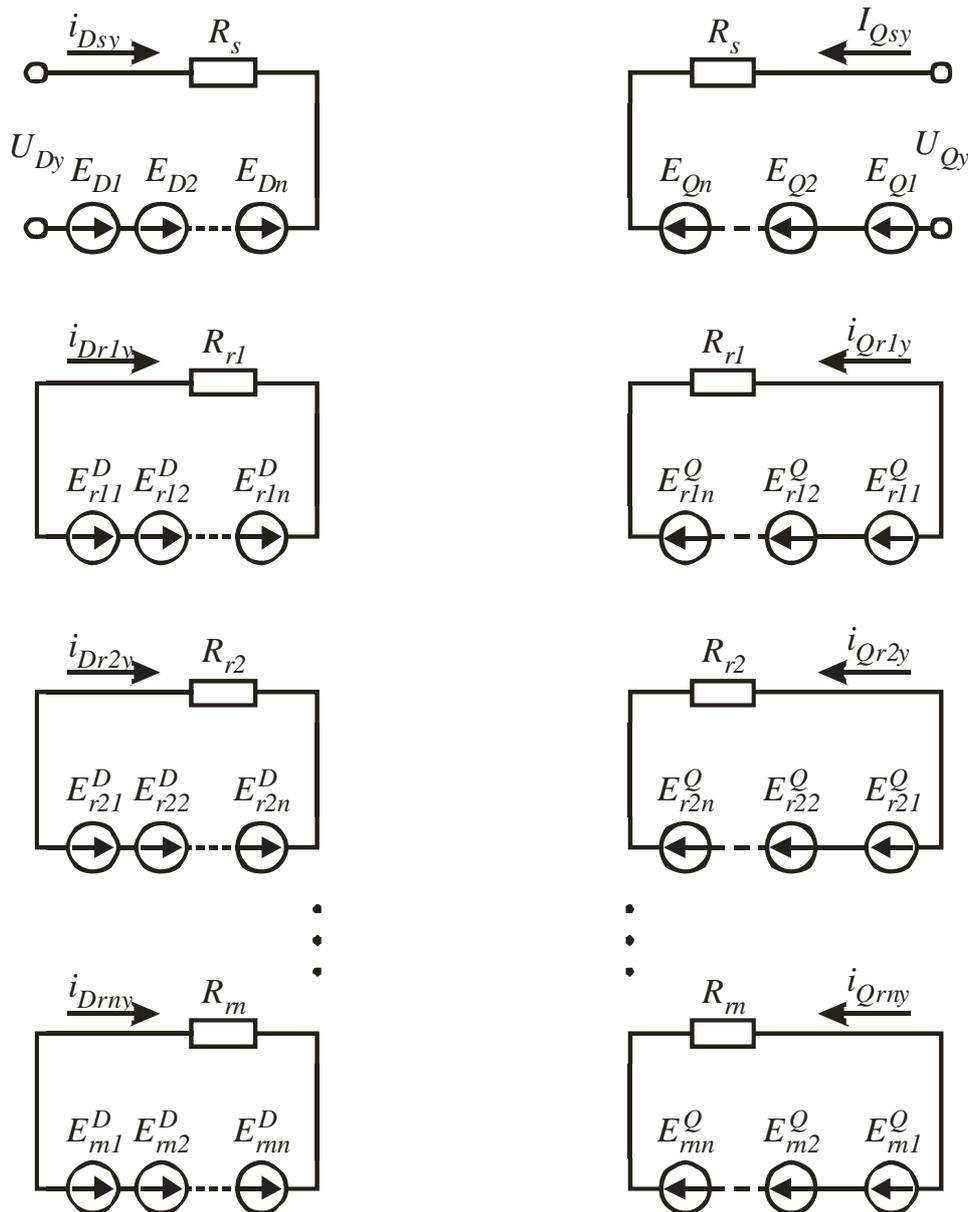


Рисунок 2 – Схема модели глубокопазного асинхронного двигателя для анализа установившихся режимов в синхронно вращающихся координатах

$$\vec{U}_F = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{I}_F = \begin{bmatrix} i_s \\ i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rn} \end{bmatrix}; \quad \check{R}_F = \begin{bmatrix} R_s & & & & \\ & R_{r1} & & & \\ & & R_{r2} & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & R_{rn} \end{bmatrix};$$

$$\check{L}_F = \begin{bmatrix} L_s & M & M & \dots & M \\ M & L_{r1} & M & \dots & M \\ M & M & L_{r2} & \dots & M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M & M & M & \dots & L_{rn} \end{bmatrix}; \quad \check{Q}_f = \begin{bmatrix} L_s & M & M & \dots & M \\ sM & sL_{r1} & sM & \dots & sM \\ sM & sM & sL_{r2} & \dots & sM \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ sM & sM & sM & \dots & sL_{rn} \end{bmatrix}.$$

Из рассмотрения представленных моделей следует, что математическая модель глубокопазного асинхронного двигателя в координатах обобщенного вектора является наиболее простой и удобной для анализа различных режимов работы систем электроснабжения, содержащих асинхронные двигатели [4, 5].

Для практических расчетов целесообразно использовать двухконтурную модель ротора асинхронного двигателя (рисунки 3, 4), на основе которой нетрудно получить аналитическое выражение для частотной характеристики глубокопазного асинхронного двигателя.

Для получения математической модели асинхронного двигателя с двухконтурным ротором в виде частотных характеристик в координатах обобщенного вектора следует исходить из следующей системы уравнений в операторной форме:

$$\left. \begin{aligned}
 U_s(p) &= [R_s + (p + j\omega_s) \cdot L_s] \cdot i_s(p) + \\
 &+ (p + j\omega_s) \cdot M \cdot i_{r1}(p) + (p + j\omega_s) \cdot M \cdot i_{r2}(p); \\
 0 &= [R_{r1} + (p + js\omega_s) \cdot L_{r1}] \cdot i_{r1}(p) + \\
 &+ (p + js\omega_s) \cdot M \cdot i_s(p) + (p + js\omega_s) \cdot M \cdot i_{r2}(p); \\
 0 &= [R_{r2} + (p + js\omega_s) \cdot L_{r2}] \cdot i_{r2}(p) + \\
 &+ (p + js\omega_s) \cdot M \cdot i_s(p) + (p + js\omega_s) \cdot M \cdot i_{r1}(p).
 \end{aligned} \right\} (7)$$

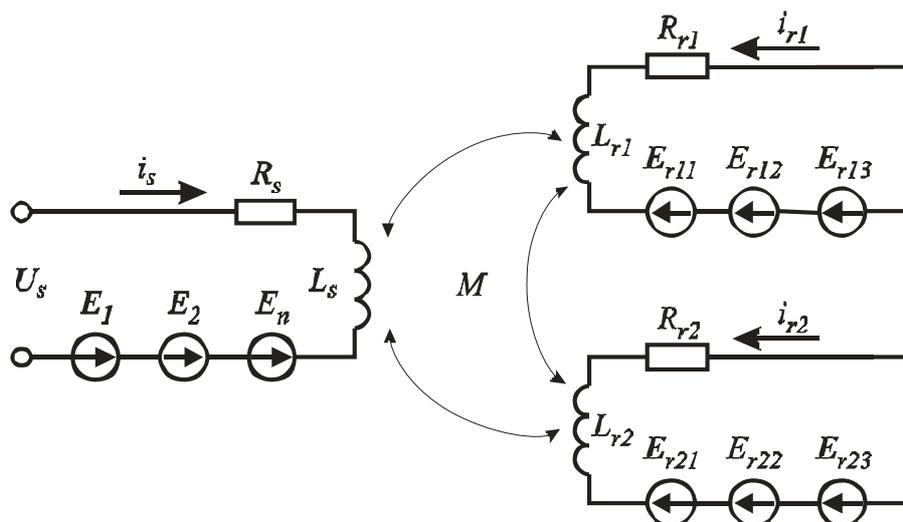


Рисунок 3 – Схема модели глубокопазного асинхронного двигателя с двухконтурным ротором для анализа переходных процессов в координатах обобщенного вектора

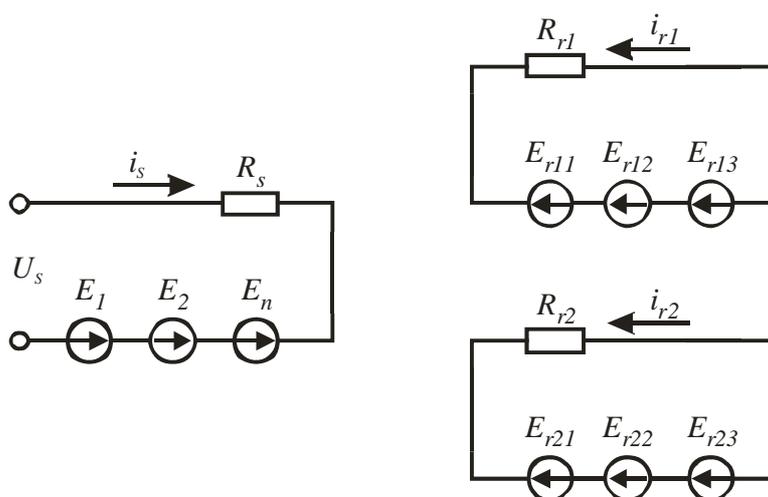


Рисунок 4 – Схема модели глубокопазного асинхронного двигателя с двухконтурным ротором для анализа установившихся

процессов в координатах обобщенного вектора

Переходя в частотную область, получим следующее выражение для частотной характеристики:

$$W(j\omega) = \frac{Z_{r2}}{(Z_s - P_1 Q_2) \cdot Z_{r2} - P_1 P_2 (Q_2 - 1)} \quad (8)$$

где

$$Z_{r2} = R_{r2} + j(\omega + s\omega_s) \cdot L_{r2};$$

$$Z_s = R_s + j(\omega + \omega_s) \cdot L_s;$$

$$P_1 = j(\omega + \omega_s) \cdot M;$$

$$P_2 = j(\omega + s\omega_s) \cdot M;$$

$$Q_2 = \frac{P_2 - \frac{P_2^2}{Z_{r2}}}{Z_{r1} - \frac{P_2^2}{Z_{r2}}};$$

$$Z_{r1} = R_{r1} + j(\omega + s\omega_s) \cdot L_{r1}.$$

В качестве примера реализации математической модели асинхронного двигателя с двухконтурным ротором в виде частотных характеристик в координатах обобщенного вектора на рисунках 5, 6 представлены действительная и мнимая части частотной характеристики широкополосного асинхронного двигателя типа 2АЗМ-2000 при скольжении $s = 1$.

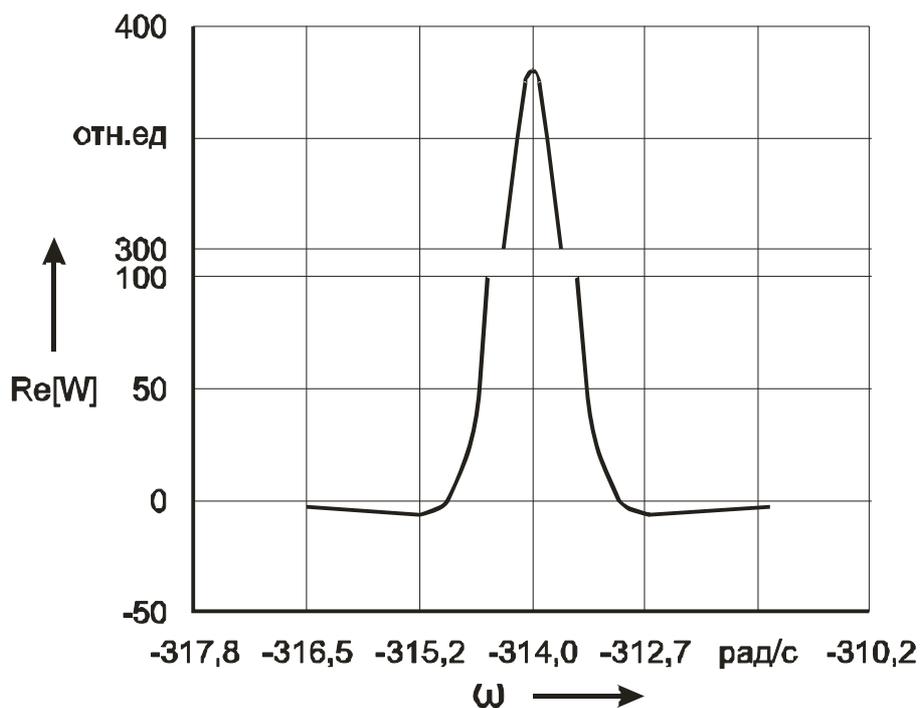


Рисунок 5 – Действительная часть частотной характеристики для асинхронного двигателя 2А3М-2000 при скольжении $s = 1$

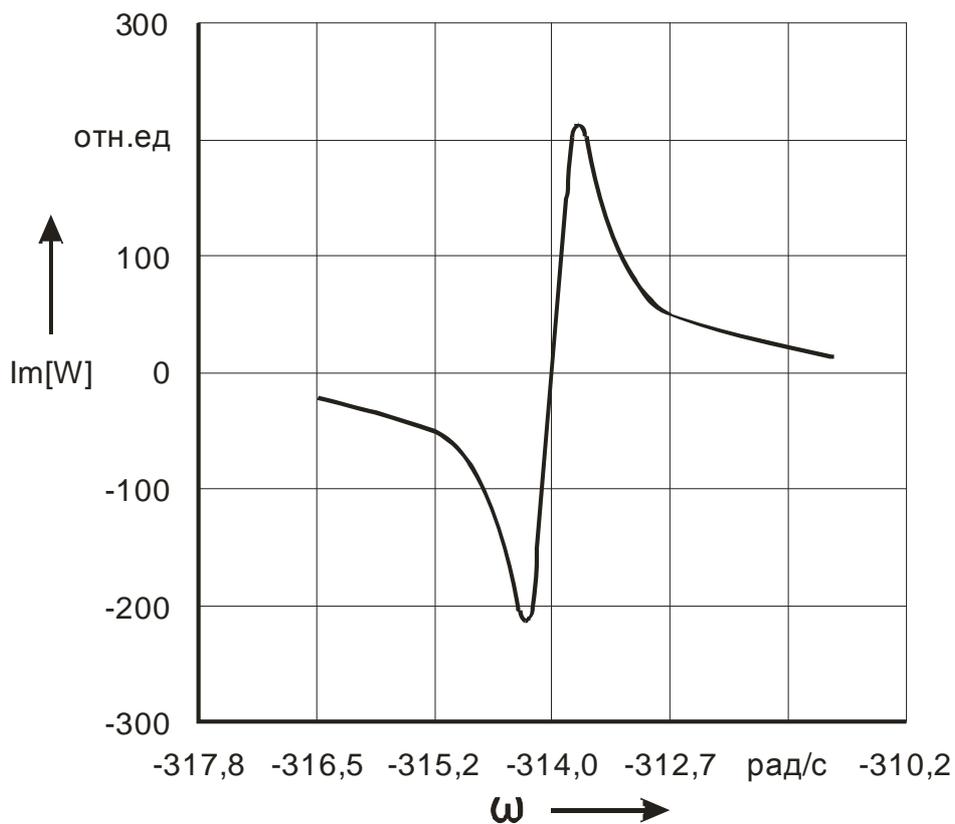


Рисунок 6 – Мнимая часть частотной характеристики для асинхронного двигателя 2А3М-2000 при скольжении $s = 1$

Список литературы

1. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. – Донецк: ДПИ, 1979. – 110 с.
2. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
3. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
4. Гамазин С.И. Самозапуск электрических двигателей. – М.: МЭИ, 1979. – 67 с.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

References

1. Sivokobylenko V.F., Kostenko V.I. Matematicheskoe modelirovanie jelektrodvigatelej sobstvennyh nuzhd jelektricheskijh stancij. – Doneck: DPI, 1979. – 110 s.
2. Kopylov I.P. Jelektricheskie mashiny. – M.: Jenergoatomizdat, 1986. – 320 s.
3. Kovach K.P., Rac I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka. – M.-L.: Gosjenergoizdat, 1963. – 744 s.
4. Gamazin S.I. Samozapusk jelektricheskijh dvigatelej. – M.: MJeI, 1979. – 67 s.
5. Syromjatnikov I.A. Rezhimy raboty asinhronnyh i sinhronnyh dvigatelej. – M.: Jenergoatomizdat, 1984. – 240 s.