

УДК 621.311.001.57

UDC 621.311.001.57

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ПОЛУЧЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЭКСПЕРИМЕНТА****OBTAINING OF FREQUENCY
CHARACTERISTICS FOR INDUCTION
MOTORS USING THE RESULTS OF THE
EXPERIMENT**

Коробейников Борис Андреевич
д.т.н., профессор
РИНЦ SPIN-код=8653-3962

Korobeinikov Boris Andreevich
Dr.Sci.Tech., professor
RSCI SPIN-code=8653-3962

Ищенко Алексей Ильич
к.т.н., доцент
РИНЦ SPIN-код=1879-6380

Ishchenko Aleksey Ilyich
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code=1879-6380

Смаглиев Александр Михайлович
к.т.н., доцент
РИНЦ SPIN-код=4549-4736
*Кубанский государственный технологический уни-
верситет, Краснодар, Россия*

Smagliev Aleksandr Mikhailovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code=4549-4736
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

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

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

Статья посвящена решению актуальной задачи, заключающейся в повышении надежности работы систем электроснабжения предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции. Материал статьи имеет исследовательский характер, состоящий в том, что полученные выражения для частотных характеристик высоковольтных асинхронных двигателей позволяют исследовать симметричные режимы их работы при помощи более эффективно и простого аппарата. Ряд положений статьи обладают научной новизной, заключающейся в получении частотных характеристик для асинхронных двигателей по результатам эксперимента. Разработана удобная для практических расчетов методика получения частотной характеристики асинхронного двигателя по результатам эксперимента на основе математической модели асинхронного двигателя в координатах обобщенного вектора и преобразования Фурье. В качестве примера приведены осциллограммы тока статора асинхронного двигателя типа А-12-52-4 для начальной стадии пуска. Для тока статора данного двигателя выполнен переход от фазной системы координат к координатам обобщенного вектора. Построены зависимости тока статора по осям D и Q от времени. Рассчитаны действительная и мнимая части частотной характеристики двигателя при скольжении $s = 1$, расчеты иллюстрированы соответствующими графическими характеристиками. Результаты исследования предлагается использовать для расчета переходных процессов в системах электроснабжения предприятий

The article is devoted to the solution of the urgent task, which is to increase the reliability of the power supply systems of enterprises for processing agricultural products. The material of the article has a research character, which consists in the fact that the obtained expressions for the frequency characteristics of high-voltage induction motors allow us to investigate the symmetric modes of their operation by means of a more efficient and simple apparatus. A number of provisions of the article have a scientific novelty, which consists in obtaining frequency characteristics for induction motors as a result of the experiment. A convenient procedure for obtaining the frequency response of an induction motor based on the results of an experiment using the mathematical model of an induction motor in the coordinates of the generalized vector and the Fourier transform has been developed. As an example, oscillograms of the stator current of an induction motor of the A-12-52-4 type are given for the initial stage of the start-up. For the stator current of this induction motor, a transition is made from the phase coordinate system to the coordinates of the generalized vector. The dependences of the stator current on the D and Q axes on time are constructed. The real and imaginary parts of the frequency characteristic of the engine are calculated for sliding $s = 1$, the calculations are illustrated by the corresponding graphical characteristics. The results of the study are proposed to be used for the calculation of transients in power supply systems for enterprises engaged in the processing of agricultural products

по переработке сельскохозяйственной продукции

Ключевые слова: КООРДИНАТЫ
ОБОБЩЕННОГО ВЕКТОРА,
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПЕРАТОР,
ОСЦИЛЛОГРАММА, ПОСТОЯННАЯ
ВРЕМЕНИ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ,
СКОЛЬЖЕНИЕ, СТАТОР, СХЕМА
ЗАМЕЩЕНИЯ, ЧАСТОТНАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКА

Keywords: COORDINATES OF THE
GENERALIZED VECTOR, MATHEMATICAL
MODEL, OPERATOR, OSCILLOGRAM, TIME
CONSTANT, FOURIER TRANSFORM, SLIP,
STATOR, DIAGRAM OF THE SUBSTITUTION,
FREQUENCY CHARACTERISTICS

Doi: 10.21515/1990-4665-131-082

В нагрузке крупных предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции (например, сахарных заводов) большой удельный вес имеют асинхронные двигатели. Они оказывают существенное влияние на надежную и устойчивую работу систем электроснабжения таких предприятий, что особенно актуально в переходных режимах. Задача расчета переходных режимов значительно упрощается при наличии осциллограмм пуска, полученных экспериментальным путем.

Для мощных асинхронных двигателей из-за значительной разницы постоянных инерции и времени протекания электромагнитных переходных процессов с достаточной степенью точности можно считать, что электромагнитные переходные процессы практически завершаются при скольжении $s = 1$ [1], поэтому для получения частотных характеристик асинхронного двигателя целесообразно использовать режим пуска.

Пусть для широкопазного асинхронного двигателя типа А-12-52-4 получены осциллограммы тока статора $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ в начальной стадии пуска, которые изображены на рисунках 1, 2, 3.

Для математической модели асинхронного двигателя переход от фазной системы координат к координатам обобщенного вектора приведен в [2, 3]. В соответствии с [2, 3] ток статора после преобразования определяется по формуле:

$$i_s(t) = i_D(t) + j i_Q(t). \quad (1)$$

где $i_D(t); i_Q(t)$ – токи обмотки статора по осям D и Q (рисунки 4, 5).

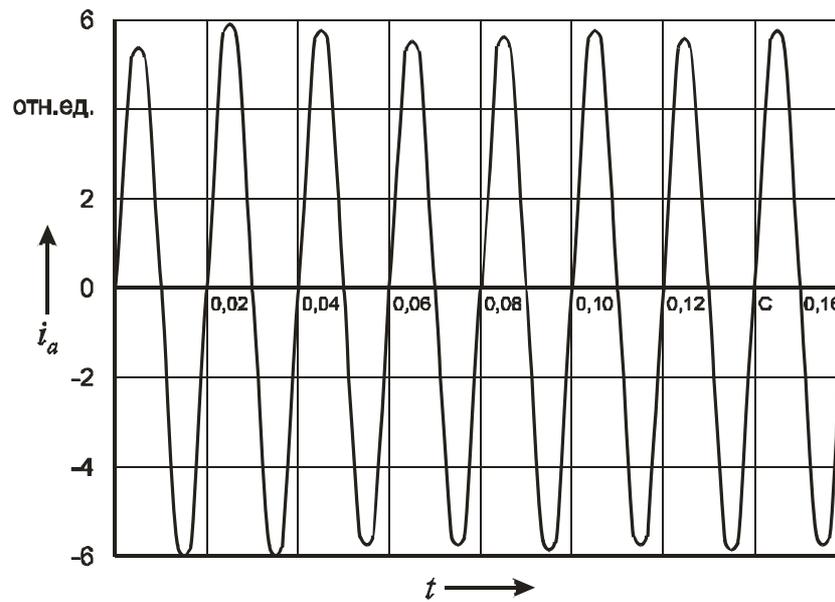


Рисунок 1 – Ток фазы А при пуске асинхронного двигателя типа А-12-52-4

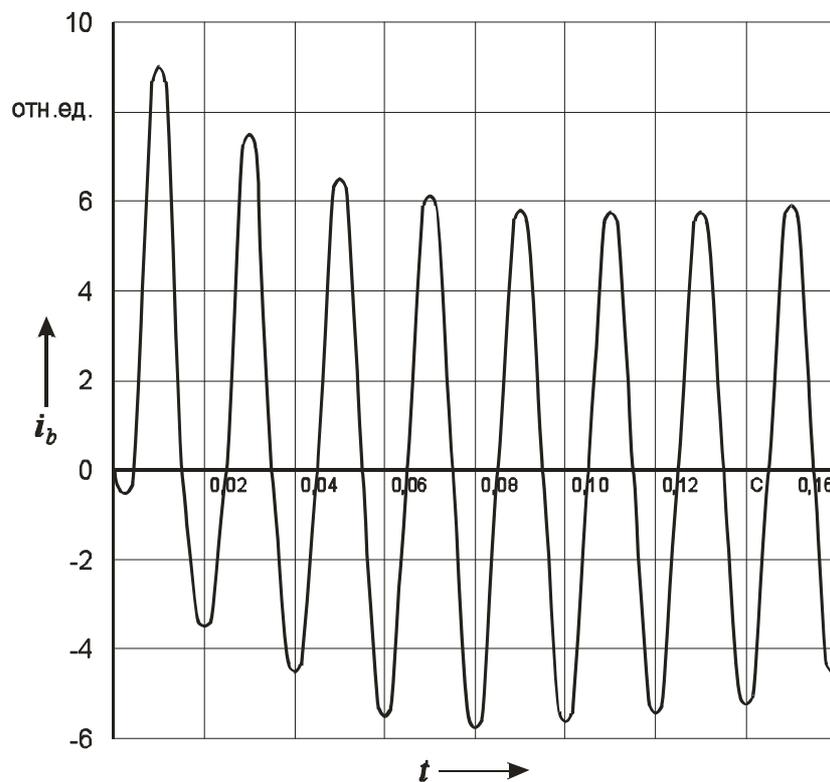


Рисунок 2 – Ток фазы В при пуске асинхронного двигателя типа А-12-52-4

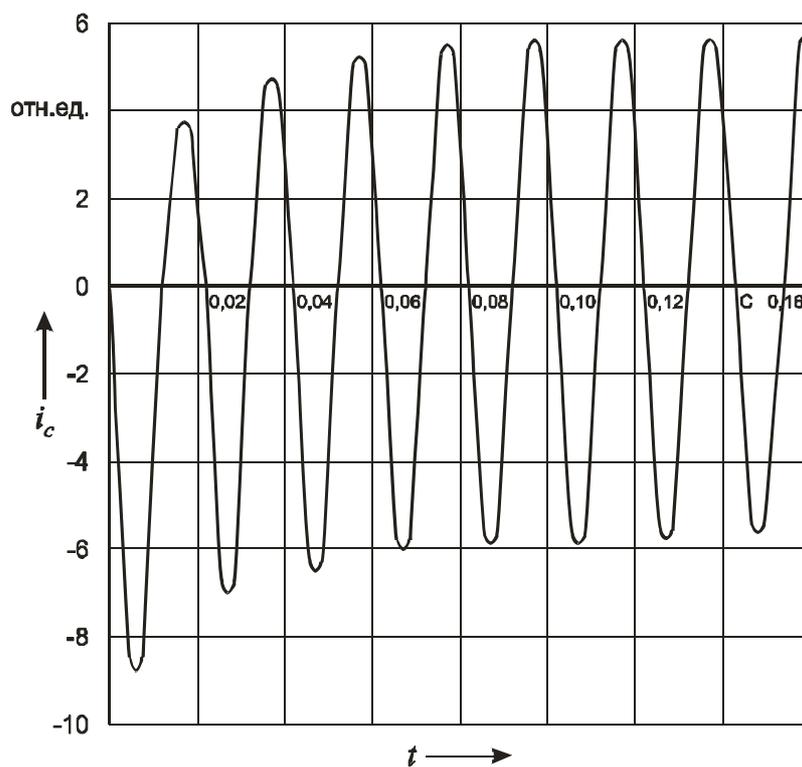
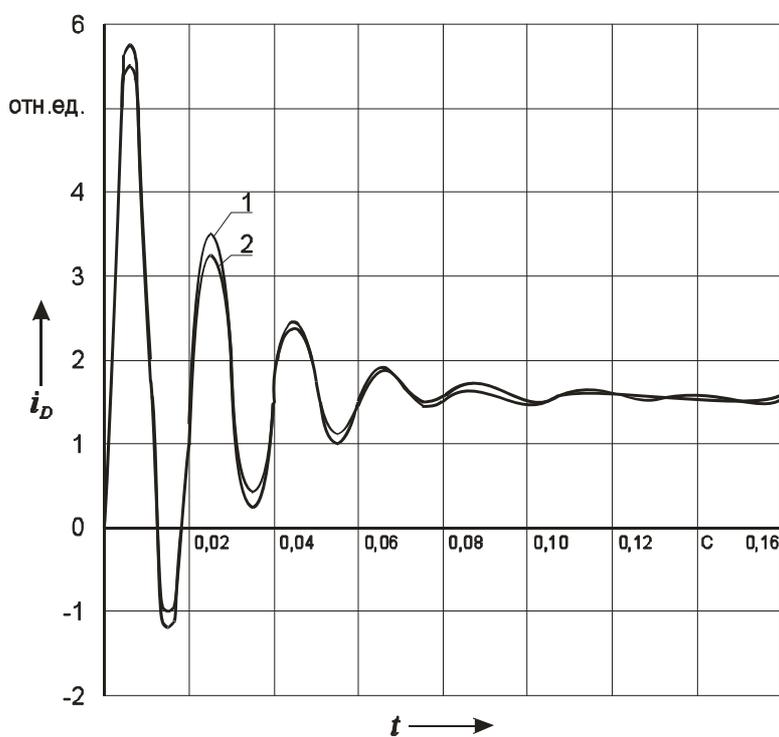


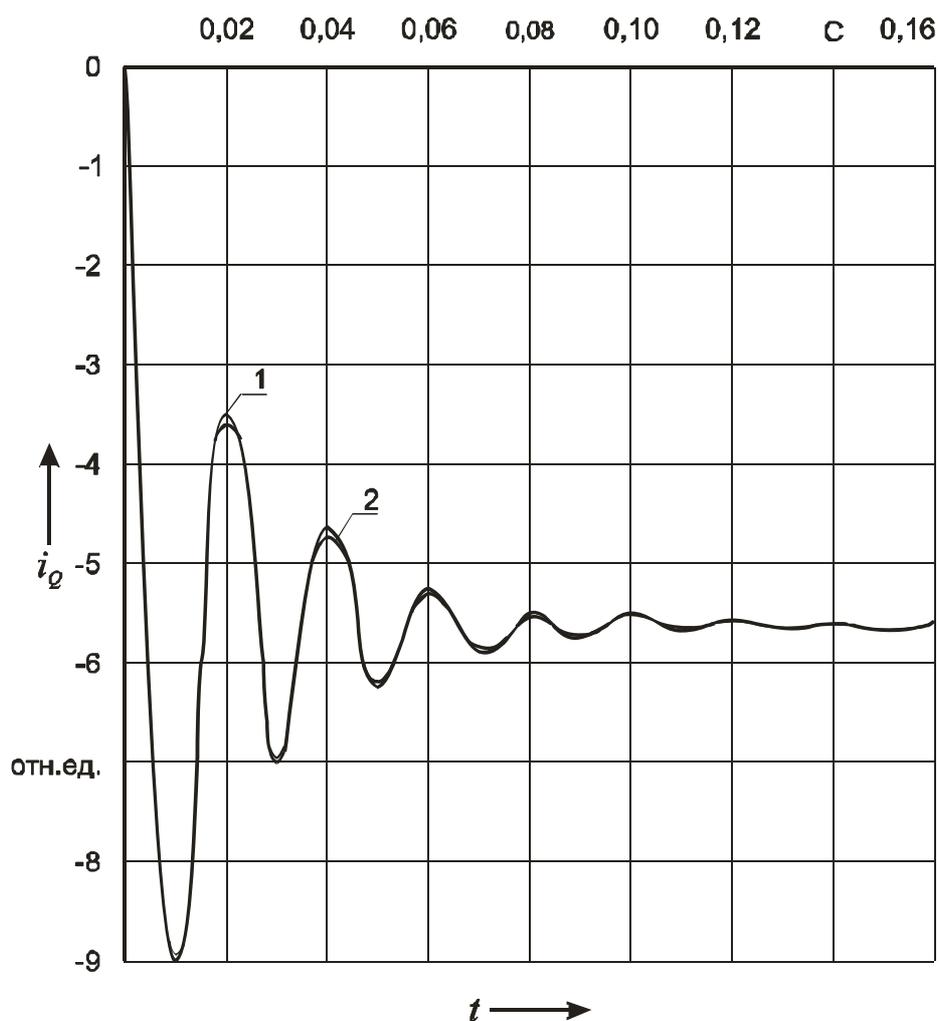
Рисунок 3 – Ток фазы С при пуске асинхронного двигателя типа А-12-52-4



1 – ток по осциллограмме

2 – ток при разбиении на 6 участков

Рисунок 4 – Зависимость $i_D(t)$ для асинхронного двигателя типа А-12-52-4



1 – ток по осциллограмме

2 – ток при разбиении на 6 участков

Рисунок 5 – Зависимость $i_Q(t)$ для асинхронного двигателя типа А-12-52-4

Применяя преобразование Фурье к напряжению $u_s(t)$ и току $i_s(t)$ статора можно получить частотную характеристику асинхронного двигателя:

$$W_{iS}(j\omega) = (i_s(j\omega)) / (u_s(j\omega)). \quad (2)$$

Представляет интерес получение экспериментальных частотных характеристик для асинхронных двигателей на основе аналитических выражений.

Пусть задана схема замещения асинхронного двигателя с переменными параметрами, представленная на рисунке 6.

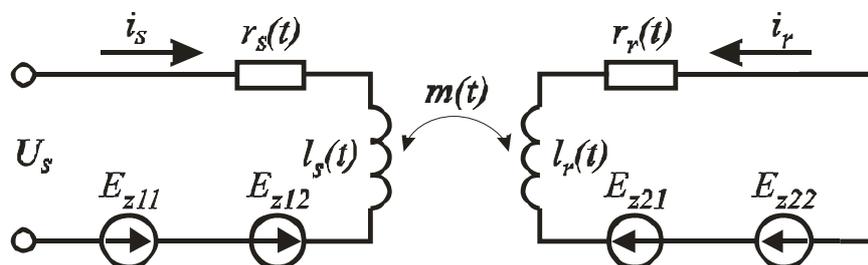


Рисунок 6 – Схема замещения асинхронного двигателя с переменными параметрами

Исходная система дифференциальных уравнений в координатах обобщенного вектора, соответствующая приведенной схеме замещения (рисунок 6) при скольжении $s = 1$, в операторной форме следующая:

$$\begin{cases} U_s = [r_s(t_i) + pl_s(t_i) + j\omega_s l_s(t_i)] \cdot i_s + [pm(t_i) + j\omega_s m(t_i)] \cdot i_{r,i} \\ 0 = [r_r(t_i) + pl_r(t_i) + j\omega_s l_r(t_i)] \cdot i_r + [pm(t_i) + j\omega_s m(t_i)] \cdot i_s \end{cases} \quad (3)$$

где t_i – интервал переходного процесса;

$$E_{z11} = j\omega_s l_s(t_i) \cdot i_s;$$

$$E_{z12} = j\omega_s m(t_i) \cdot i_r;$$

$$E_{z21} = j\omega_s m(t_i) \cdot i_s;$$

$$E_{z22} = j\omega_s l_r(t_i) \cdot i_r.$$

Пусть система уравнений (3) преобразована к виду:

$$U_s = Z(p) \cdot i_s, \quad (4)$$

где

$$Z(p) = r_s \cdot \frac{\sigma T_s T_r (p + j\omega_s)(p + j\omega_s) + (p + j\omega_s)T_s + (p + j\omega_s)T_r + 1}{1 + (p + j\omega_s)T_r};$$

$$T_{1S} = l_{1S}/r_{1S}; T_{1r} = l_{1r}/r_{1r}; (= 1 - m^2)/(l_{1r} l_{1S}).$$

В координатах обобщенного вектора в относительных единицах напряжение питания при коммутации в момент перехода напряжения через нуль в фазе А

$$U_s = \frac{1}{p}. \tag{5}$$

При пуске двигателя $s=1$ и выражение (4) значительно упрощается. При этом ток в операторной форме

$$i_s = \frac{1}{pZ(p)}. \tag{6}$$

Согласно теоремы разложения, ток статора

$$i_{1S}(t) = \frac{1}{r_{1S}} \sum_{i=1}^3 (i=1)^{\text{т}} \frac{1 + (p_i i + j(l_{1S}) T_{1r})}{(3A_{1S} p_i^2 + 2B_{1S} p_i + C_{1S})} e^{p_i t} \tag{7}$$

где

$$A_s = \sigma T_s T_r;$$

$$B_s = (T_r + T_s) + j2\omega_s \sigma T_s T_r;$$

$$C_s = (1 - \sigma T_s T_r \omega_s^2) + j(T_r + T_s)\omega_s.$$

Корни характеристического уравнения $pZ(p) = 0$ соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= 0; \\ p_{2,3} &= -j\omega_s \pm \alpha, \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

где

$$\alpha = -\frac{T_s + T_r}{2\sigma T_s T_r} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4\sigma T_s T_r}{(T_s + T_r)^2}} \right].$$

В результате преобразований ток статора при пуске равен:

$$i_s(t) = \frac{1}{r_s} [F_s + D_s e^{(-\alpha - j\omega_s)t} + E_s e^{(\alpha - j\omega_s)t}]. \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} F_s &= \frac{1 + j\omega_s T_r}{C_s}; \\ D_s &= \frac{1 + (p_2 + j\omega_s)T_r}{3A_s p_2^2 + 2B_s p_2 + C_s}; \\ E_s &= \frac{1 + (p_3 + j\omega_s)T_r}{3A_s p_3^2 + 2B_s p_3 + C_s}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Пусть переходный процесс разбивается на произвольное число n равных участков. Тогда для каждого участка асинхронный двигатель характеризуется соответствующей совокупностью параметров $r_s(t_i), r_r(t_i), l_s(t_i), l_r(t_i)$.

Для каждого i -го участка тока $i_s(t)$ переходного процесса во времени можно получить на основе преобразования Фурье его выражение в частотной области. Поскольку в координатах обобщенного вектора в операторной форме напряжение питания имеет простое аналитическое выражение, то для каждого участка переходного процесса можно получить выражение для частотной характеристики. Задача получения частотных характеристик упрощается еще и тем, что ток $i_s(t)$ представлен в виде простых составляющих.

Для первого интервала времени частотная характеристика следующая:

$$W_{11}(j\omega) = -F_{s1}S1 (e^{(-j\omega t_1)} - 1) - D_{s1}S1/(\alpha_1 + j(\omega_s + \omega)) [e^{(-\alpha_1 - j(\omega_s + \omega)t_1)} + \frac{E_{s1}}{\alpha_1 - j(\omega_s + \omega)} [e^{(\alpha_1 - j(\omega_s + \omega)t_1} - 1)]. \quad (11)$$

Величины $F_{s1}, D_{s1}, E_{s1}, \alpha_1$ получаются на основе выражений (8), (9) путем подстановки параметров модели для первого интервала времени.

Для интервала i после преобразований

$$\begin{aligned}
 W_{1i}(j\omega) = & -F_{s1} S_i (e^{-(j\omega_s + \omega)t_i} - e^{-(j\omega_s + \omega)t_{i-1}}) - \\
 & - \frac{D_{s1}}{\alpha_i + j(\omega_s + \omega)} [e^{[\alpha_i - j(\omega_s + \omega)]t_i} - e^{[\alpha_i - j(\omega_s + \omega)]t_{i-1}}] + \\
 & + \frac{E_{s1}}{\alpha_i - j(\omega_s + \omega)} [e^{[\alpha_i - j(\omega_s + \omega)]t_i} - e^{[\alpha_i - j(\omega_s + \omega)]t_{i-1}}].
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Для последнего интервала n

$$\begin{aligned}
 W_{1n}(j\omega) = & F_{s1} S_n e^{-(j\omega_s + \omega)t_n} + D_{s1} S_n / (\alpha_n + j(\omega_s + \omega)) e^{[-\alpha_n - j(\omega_s + \omega)]t_n} + \\
 & - \frac{E_{s1}}{\alpha_n - j(\omega_s + \omega)} e^{[\alpha_n - j(\omega_s + \omega)]t_n}.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Результирующую частотную характеристику можно получить, суммируя частотные характеристики по отдельным участкам:

$$\mathbf{W}_{1\Theta}(j\omega) = \sum_{i=1}^n \mathbf{W}_{1i}(j\omega).
 \tag{14}$$

Для указанного асинхронного двигателя на рисунках 7 и 8 приведены действительная и мнимая части частотной характеристики, полученные на основе предложенной методики при делении интервала переходного процесса на 6 участков. На этих же рисунках приведены действительная и мнимая части частотной характеристики, полученные на основе модели этого двигателя.

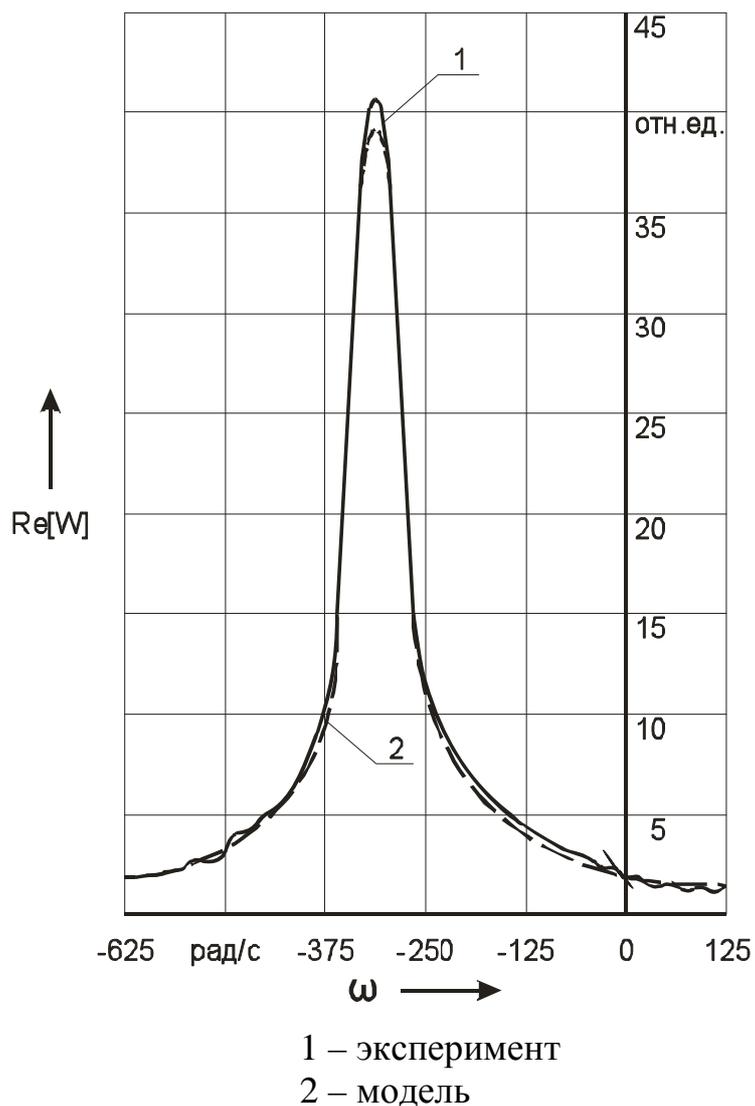
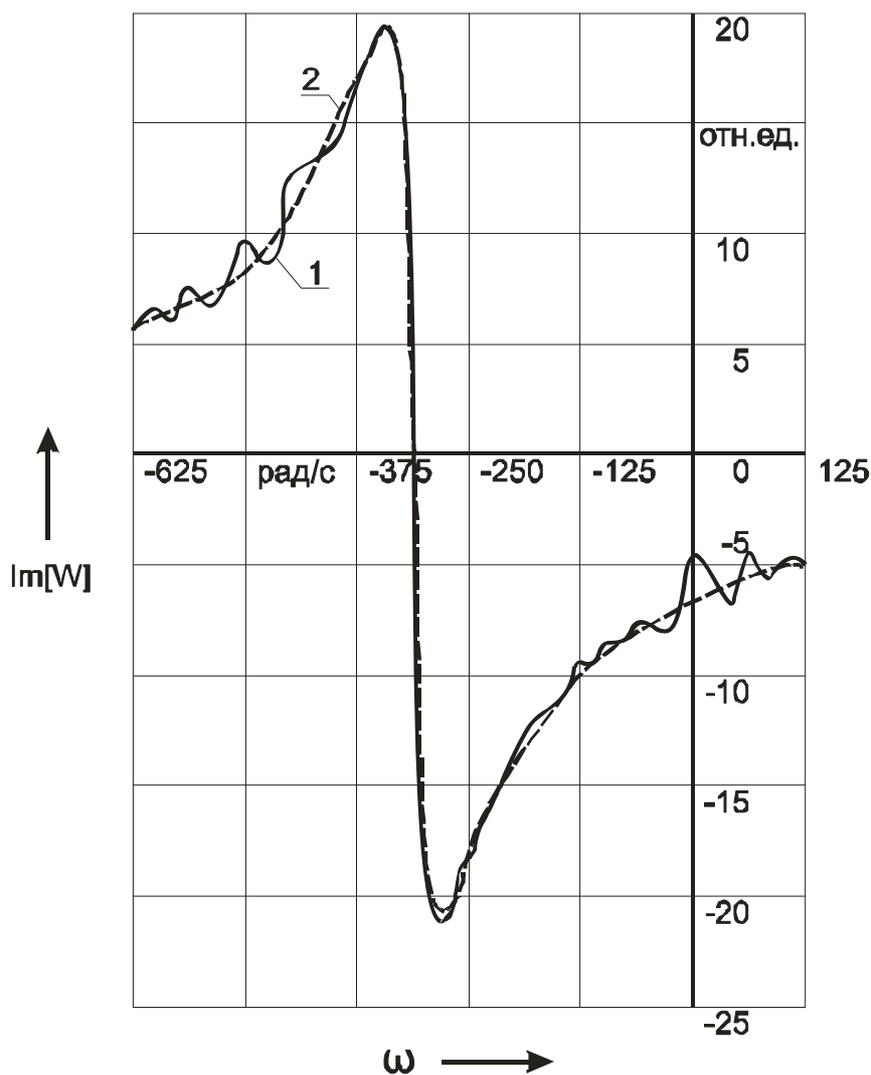


Рисунок 7 – Действительная часть частотной характеристики асинхронного двигателя типа А-12-52-4



1 – эксперимент

2 – модель

Рисунок 8 – Мнимая часть частотной характеристики асинхронного двигателя типа А-12-52-4

В результате данного исследования получена эффективная и простая методика, позволяющая на основе полученной экспериментально осциллограммы пуска высоковольтного асинхронного двигателя сформировать его частотную характеристику, которая позволяет повысить точность расчетов переходных процессов.

Список литературы

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
2. Математическое моделирование высоковольтных асинхронных двигателей предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции / Б.А. Коробейников, А.И. Ищенко, А.М. Смаглиев и др. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – №06(110). С. 531 – 541. – IDA [article ID]: 1101506036. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/06/pdf/36.pdf>, 0,688 у.п.л.
3. Моделирование глубоководных асинхронных двигателей систем электрообеспечения сахарных заводов / Б.А. Коробейников, А.И. Ищенко, А.М. Смаглиев, И.В. Ольшанская // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №08(122). С. 642 – 655. – IDA [article ID]: 1221608044. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/08/pdf/44.pdf>, 0,875 у.п.л.

References

1. Kovach K.P., Rac I. Perehodnye processy v mashinah peremennogo toka. – M.-L.: Gosjenergoizdat, 1963. – 744 s.
2. Matematicheskoe modelirovanie vysokovol'tnyh asinhronnyh dvigatelej predpriyatij po pererabotke sel'skohozyajstvennoj produkcii / B.A. Korobejnikov, A.I. Ishchenko, A.M. Smagliev i dr. // Politematicheskij setевой ehlektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [EHlektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2015. – №06(110). S. 531 – 541. – IDA [article ID]: 1101506036. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2015/06/pdf/36.pdf>, 0,688 u.p.l.
3. Modelirovanie glubokopaznyh asinhronnyh dvigatelej sistem ehlektrosnabzheniya saharnyh zavodov / B.A. Korobejnikov, A.I. Ishchenko, A.M. Smagliev, I.V. Ol'shanskaya // Politematicheskij setевой ehlektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [EHlektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2016. – №08(122). S. 642 – 655. – IDA [article ID]: 1221608044. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2016/08/pdf/44.pdf>, 0,875 u.p.l.