

*к.т.н. Морозов Д.И.,
Сопов А.А.,
к.т.н. Андреева Н.И.,
Калюжный С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА БАЗЕ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Наведені результати теоретичних досліджень динамічних характеристик індуктивно-ємнісного перетворювача, отримані перехідні характеристики та передатна функція ІЄП в загальному виді.

***Ключові слова:** індуктивно-ємнісний перетворювач, джерело струму, передатна функція, динамічні характеристики.*

Приведены результаты теоретических исследований динамических свойств индуктивно-емкостного преобразователя, получены переходные характеристики и передаточная функция ИЕП в общем виде.

***Ключевые слова:** индуктивно-емкостной преобразователь, источник тока, передаточная функция, динамические характеристики.*

Имеется ряд областей техники (электролиз, гальванопластика, зарядные устройства, сталеплавильные печи, электропривод), где использование источников тока (ИТ) вместо источников напряжения (ИН) даёт значительный эффект [1]. Однако динамические свойства ИТ на базе индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) изучены недостаточно полно в связи с несовершенством средств для таких исследований при очень сложных процессах в нём.

Постановка задачи исследования. Цель данной работы – определение предельных динамических возможностей таких ИТ, используя мощное современное компьютерное программное обеспечение.

Материалы и результаты исследований. Объектом исследований является ИЕП по схеме Штейнметца с выходом на переменном токе, принципиальная схема которого изображена на рисунке 1.

Математическая модель для этого случая представляет систему (1) из шести дифференциальных и шести алгебраических уравнений. Структурная схема по ним изображена на рисунке 2.

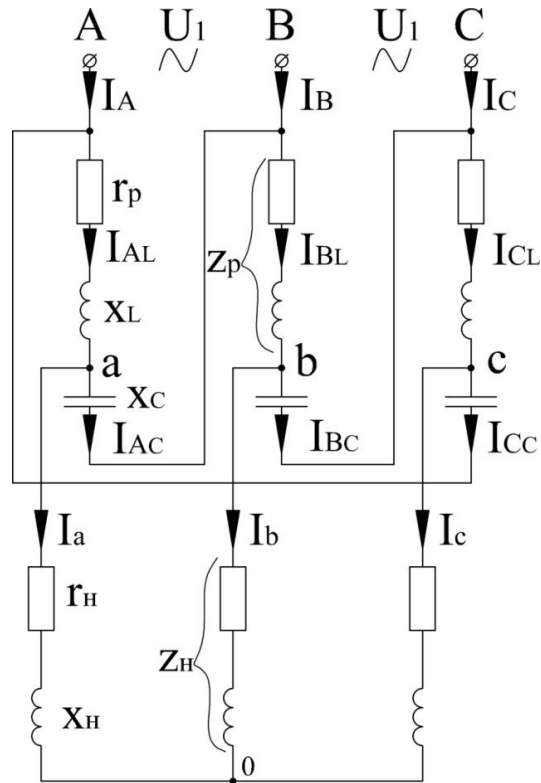


Рисунок 1 – ИЕП по схеме Штейнметца

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_m \sin \omega_1 t = i_{A_L} r_p (1 + T_p p) + i_a r_h (1 + T_h p) \\
 U_B &= U_m \sin \left(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3} \right) = i_{B_L} r_p (1 + T_p p) + i_b r_h (1 + T_h p) \\
 U_C &= U_m \sin \left(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3} \right) = i_{C_L} r_p (1 + T_p p) + i_c r_h (1 + T_h p) \\
 U_{AB} &= \sqrt{3} U_m \sin \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6} \right) = i_{A_L} r_p (1 + T_p p) + i_{A_C} \frac{1}{pC} \\
 U_{BC} &= \sqrt{3} U_m \sin \left(\omega_1 t - \frac{\pi}{2} \right) = i_{B_L} r_p (1 + T_p p) + i_{B_C} \frac{1}{pC} \\
 U_{CA} &= \sqrt{3} U_m \sin \left(\omega_1 t + \frac{7\pi}{6} \right) = i_{C_L} r_p (1 + T_p p) + i_{C_C} \frac{1}{pC} \\
 i_A + i_C &= i_{A_L}; i_B + i_A = i_{B_L}; i_C + i_B = i_{C_L}; \\
 i_{A_L} &= i_a + i_{A_C}; i_{B_L} = i_b + i_{B_C}; i_{C_L} = i_c + i_{C_C};
 \end{aligned} \tag{1}$$

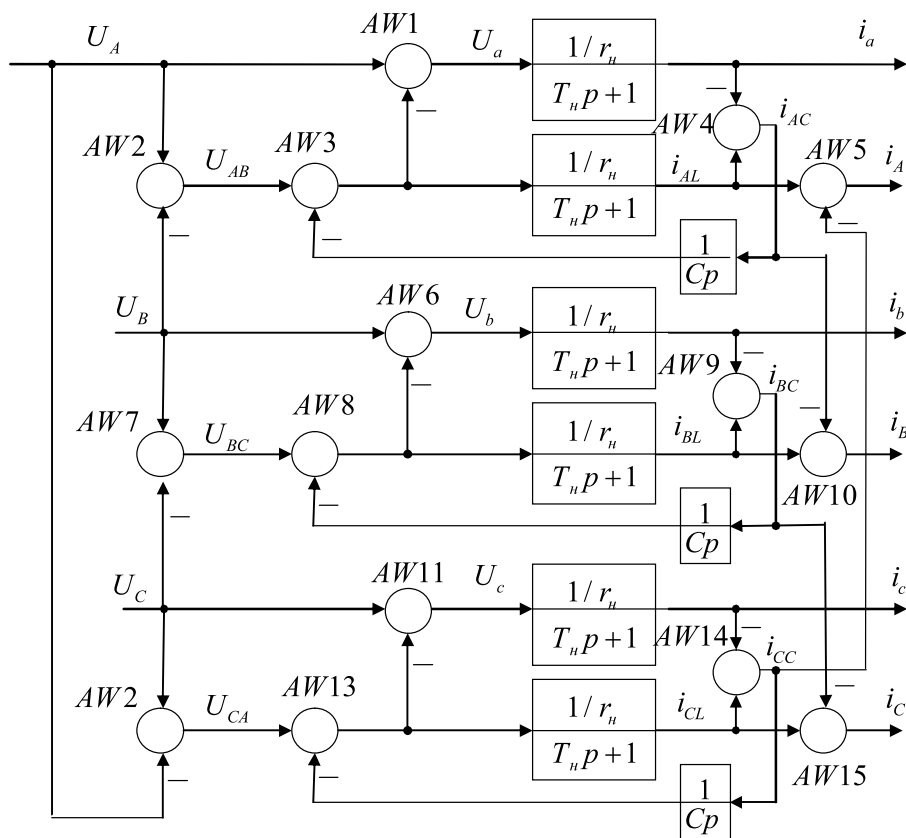


Рисунок 2 – Структурная схема ИЕП с выходом на переменном токе

Определение передаточной функции ИЕП. Как видно из схемы на рисунке 2, ИЕП представляет собой достаточно сложное трёхканальное устройство с перекрёстными связями между каналами. Представляет интерес получение передаточной функции (ПФ) такого устройства как по каждому каналу, так и по обобщённому каналу передачи энергии (обобщённый вектор входного напряжения – обобщённый вектор выходного тока). Число вариантов достигает, естественно, девяти – от каждого из трёх входных напряжений (U_A, U_B, U_C) на каждый выходной ток (i_a, i_b, i_c). Структура схемотехнической модели для исследования ПФ представлена на рисунке 3.

Используя команду `power_analyze` [2] (для линеаризации модели и получения связей между источниками питания и измерителями) и команду преобразования математического описания, получено 9 передаточных функций от каждого входа (фазные напряжения питания ИЕП) к каждому выходу (выходные фазные токи ИЕП). В результате сравнения сигналов токов по схемотехнической модели и по ПФ была обнаружена их идентичность. Было отмечено, что ПФ совпадают определённым образом:

$$W_{AA}(p) = W_{BB}(p) = W_{CC}(p) = W_1(p); W_{BA}(p) = W_{CB}(p) = W_{AC}(p) = W_2(p);$$

$$W_{AB}(p) = W_{BC}(p) = W_{CA}(p) = W_3(p),$$

где W_{ij} – ПФ с i -го входа на j -й выход;

$$W_1(p) = \frac{H_1(p)}{D(p)}; W_2(p) = \frac{H_2(p)}{D(p)}; W_3(p) = \frac{H_3(p)}{D(p)};$$

$$H_1(p) = -h_6 p^6 - h_5 p^5 + 0 \cdot p^4 + h_3 p^3 + h_2 p^2 + 2h_1 p + 2h_0;$$

$$H_2(p) = 2h_6 p^6 + 2h_5 p^5 + h_4 p^4 + h_3 p^3 + 0 \cdot p^2 - h_1 p - h_0;$$

$$H_3(p) = -h_6 p^6 - h_5 p^5 - h_4 p^4 - 2h_3 p^3 - h_2 p^2 - h_1 p - h_0;$$

$$D(p) = d_6 p^6 + d_5 p^5 + d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0;$$

h_i и d_i – коэффициенты полиномов соответственно числителя и знаменателя.

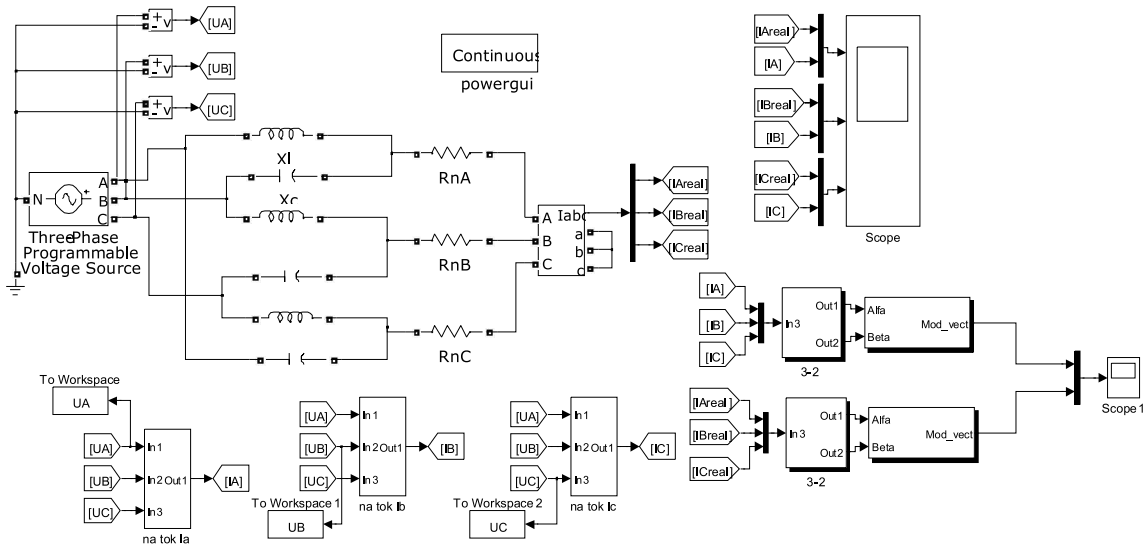


Рисунок 3 – Структура схемотехнической модели для исследований ПФ

Поэтому можем записать матричное уравнение для токов:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1(p) & W_2(p) & W_3(p) \\ W_3(p) & W_1(p) & W_2(p) \\ W_2(p) & W_3(p) & W_1(p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix}.$$

Согласно полученному уравнению распишем каждый ток в следующем виде:

$$\begin{aligned}
i_a &= W_1(p)U_A + W_2(p)U_B + W_3(p)U_C; \\
i_b &= W_3(p)U_A + W_1(p)U_B + W_2(p)U_C; \\
i_c &= W_2(p)U_A + W_3(p)U_B + W_1(p)U_C.
\end{aligned} \tag{2}$$

Исходя из уравнений (2), можем записать выражение для модуля обобщённого вектора тока:

$$\begin{aligned}
|\vec{i}| &= \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\left[i_a - \frac{1}{2}(i_b + i_c)\right]\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\left[\frac{\sqrt{3}}{2}(i_b - i_c)\right]\right)^2} = \\
&= \frac{2}{3}\sqrt{i_a^2 - i_a(i_b + i_c) + \frac{1}{4}(i_b + i_c)^2 + \frac{3}{4}(i_b - i_c)^2} = \\
&= \frac{2}{3}\sqrt{i_a^2 - i_a i_b - i_a i_c + \frac{1}{4}i_b^2 + \frac{1}{2}i_b i_c + \frac{1}{4}i_c^2 + \frac{3}{4}i_b^2 - \frac{3}{2}i_b i_c + \frac{3}{4}i_c^2} = \\
&= \frac{2}{3}\sqrt{i_a^2 + i_b^2 + i_c^2 - (i_a i_b + i_b i_c + i_c i_a)}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Подставим выражения для токов (2) в (3). Знаменатели всех передаточных функций оказались одинаковыми, то есть при подстановке получится, что $D(p)$ можно вынести из-под знака корня. Таким образом получим:

$$\begin{aligned}
|\vec{i}| &= \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{D(p)} \sqrt{(H_1 U_A + H_2 U_B + H_3 U_C)^2 + (H_3 U_A + H_1 U_B + H_2 U_C)^2 + \dots} \\
&\frac{(H_2 U_A + H_3 U_B + H_1 U_C)^2 - (H_1 U_A + H_2 U_B + H_3 U_C)(H_3 U_A + H_1 U_B + H_2 U_C) - \dots}{-(H_3 U_A + H_1 U_B + H_2 U_C)(H_2 U_A + H_3 U_B + H_1 U_C) - (H_2 U_A + H_3 U_B + H_1 U_C) \times \dots} \\
&\frac{(H_1 U_A + H_2 U_B + H_3 U_C)}{D(p)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{D(p)} \sqrt{A}.
\end{aligned} \tag{4}$$

После преобразований получим выражение для A :

$$\begin{aligned}
A &= h_2 u_2 + 2h_1 u_1 - h_1 u_2 - (h_1 + h_2)u_1 = h_2 u_2 + 2h_1 u_1 - h_1 u_2 - h_1 u_1 - h_2 u_1 = \\
&= u_2(h_2 - h_1) + u_1(h_1 - h_2) = u_2(h_2 - h_1) - u_1(h_2 - h_1) = (h_2 - h_1)(u_2 - u_1) = \\
&= (H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 - [H_1 H_2 + H_2 H_3 + H_3 H_1]) \times \\
&\times (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - [U_A U_B + U_B U_C + U_C U_A]).
\end{aligned} \tag{5}$$

Подставим полученное выражение для A (5) в (4) и получим:

$$\begin{aligned}
|\vec{i}| &= \frac{2}{3} \sqrt{(U_A^2 + U_B^2 + U_C^2 - [U_A U_B + U_B U_C + U_C U_A])} \times \\
&\times \frac{1}{D(p)} \sqrt{(H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 - [H_1 H_2 + H_2 H_3 + H_3 H_1])} = \\
&= |\vec{U}| \cdot \frac{1}{D(p)} \sqrt{(H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 - [H_1 H_2 + H_2 H_3 + H_3 H_1])} =
\end{aligned}$$

Тогда конечная формула для общей передаточной функции ИЕП будет выглядеть следующим образом:

$$W_{ИЕП} = \frac{|\vec{i}|}{|\vec{U}|} = \frac{H(p)}{D(p)} = \frac{\sqrt{(H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 - [H_1 H_2 + H_2 H_3 + H_3 H_1])}}{D(p)} = \frac{\sqrt{HH(p)}}{D(p)}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
\text{где } HH(p) &= 9h_6^2 p^{12} + 18h_6 h_5 p^{11} + (9h_5^2 + 9h_6 h_4) p^{10} + (9h_5 h_4 + 9h_6 h_3) p^9 + \\
&+ (9h_5 h_3 + 3h_4^2) p^8 + (9h_4 h_3 - 9h_6 h_1) p^7 + (9h_3^2 - 9h_5 h_1 - 9h_6 h_0 + 3h_4 h_2) p^6 + \\
&+ (-9h_5 h_0 + 9h_3 h_2) p^5 + (3h_2^2 + 9h_3 h_1) p^4 + (9h_2 h_1 + 9h_3 h_0) p^3 + \\
&+ (9h_2 h_0 + 9h_1^2) p^2 + 18h_1 h_0 p + 9h_0^2.
\end{aligned}$$

Можно сделать вывод, что ИЕП с активной нагрузкой является объектом 6-го порядка и описывается ПФ в виде (6). По ней весьма затруднительно сделать общий вывод о влиянии параметров преобразователя и нагрузки на динамику, поскольку корни полиномов числителя и знаменателя в (6) можно получить лишь численными методами. Поэтому значительно проще исследовать динамику ИЕП по переходным характеристикам, используя схемотехническое моделирование в среде SimPowerSystems и Simulink пакета MATLAB.

В качестве примера на рисунке 4 а,б приведены переходные характеристики идеального ($r_p = 0$) и неидеального ($r_p \neq 0$) ИЕП для модуля обобщённого вектора выходного тока.

Как видно, при отсутствии нагрузки идеальный ИЕП (рисунок 4 а) представляет собой консервативное звено, поскольку отсутствует поглощение энергии колебаний. Естественно, интенсивность затухания переходной функции пропорциональна величине отбираемой мощности. Неидеальность реактора (рисунок 4 б), с одной стороны, обеспечивает затухание колебаний выходного тока, но с другой – появление статической ошибки.

Расстройство резонанса в ИЕП из-за изменения параметров x_L, x_C вызывает появление статической ошибки в стабилизации выходного то-

ка, величина которой определяется при подстановке в (2) вместо $\dot{z}_p \rightarrow r_p + j(x_p \pm \Delta x_p)$ и $\dot{x}_c \rightarrow -j(x_c \pm \Delta x_c)$. На качество переходных процессов 10%-ное изменение их практически не влияет. То же можно сказать и о «плавании» частоты питающей сети в таких же пределах.

Динамика ИЕП по каналу возмущения (изменение нагрузки). Реакция на скачкообразное увеличение нагрузки (рисунок 6) заканчивается практически через период питающего напряжения, что говорит о высоком быстродействии этого устройства. Следует учесть то обстоятельство, что на выходе ИЕП будут использоваться вентильные устройства для регулирования величины выходного тока. Как видно из рисунка 6,а, после увеличения величины активного сопротивления нагрузки ($t_n = 0,2 \text{ сек}$) фазовые сдвиги входного i_A и выходного i_a токов остались прежними. При этом входной ток совпадает со входным напряжением ИЕП, т.е. последний электромагнитно совместим с питающей сетью. То же можно сказать и об уменьшении активно-индуктивного сопротивления на выходе (рисунок 6,б). Однако, в этом случае входной ток опережает своё напряжение, что говорит о его емкостном характере. Другими словами, ИЕП с таким видом нагрузки является генератором в сеть реактивного тока (индуктивного характера), что очень важно при дефиците его с работающими рядом трансформаторами и асинхронными машинами.

В обоих случаях величина (амплитуда) выходного тока остаётся практически неизменной.

Характер изменения выходных токов по всем трём фазам демонстрирует рисунок 7 во время появления возмущения. Величина сопротивления нагрузки - активной (а) или активно-индуктивной (б) изменялась скачкообразно в момент времени 0.06 с. Как видно из кривых, процессы при активной нагрузке устанавливаются в течение периода питающего напряжения, а активно-индуктивной – в течении двух периодов. Таким образом, длительность всех электромагнитных процессов в ИЕП не превышает двух периодов питающего напряжения, что при использовании ИЕП в качестве источника питания для ЭП не может существенно повлиять на динамику ЭП, особенно если выходным током ИЕП целенаправленно управлять.

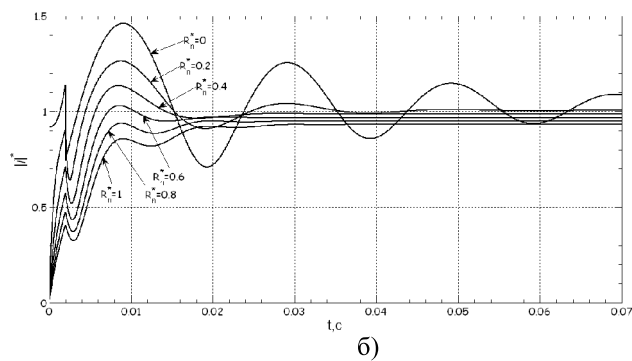
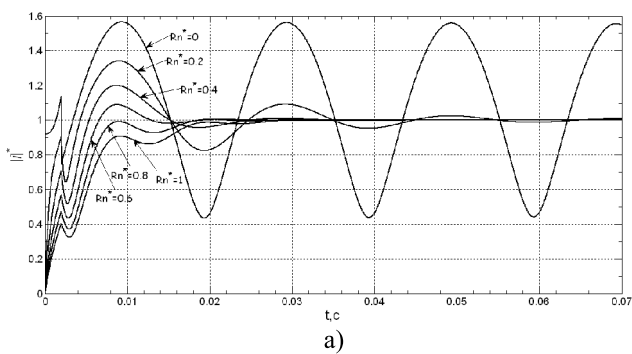


Рисунок 4 – Переходные характеристики ИЕП для модуля обобщённого вектора тока при увеличении нагрузки от $0,1Z_6$ до Z_6 , ИЕП настроен на резонанс: а) $r_p = 0$; б) $r_p^* = 0,1$

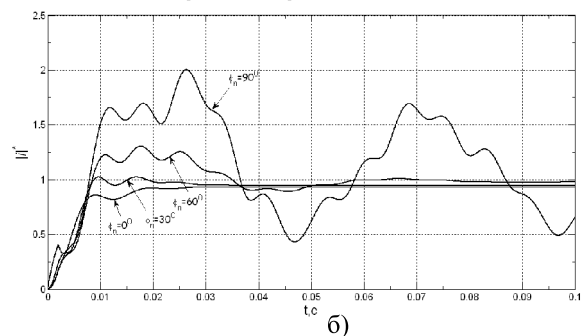
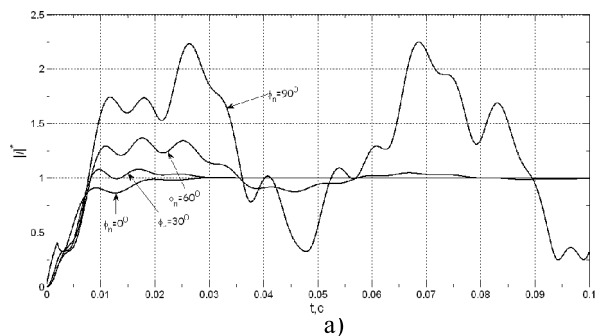


Рисунок 5 – Переходные характеристики ИЕП для модуля обобщённого вектора тока при изменении угла нагрузки, ИЕП настроен на резонанс: а) $r_p = 0$; б) $r_p^* = 0,1$

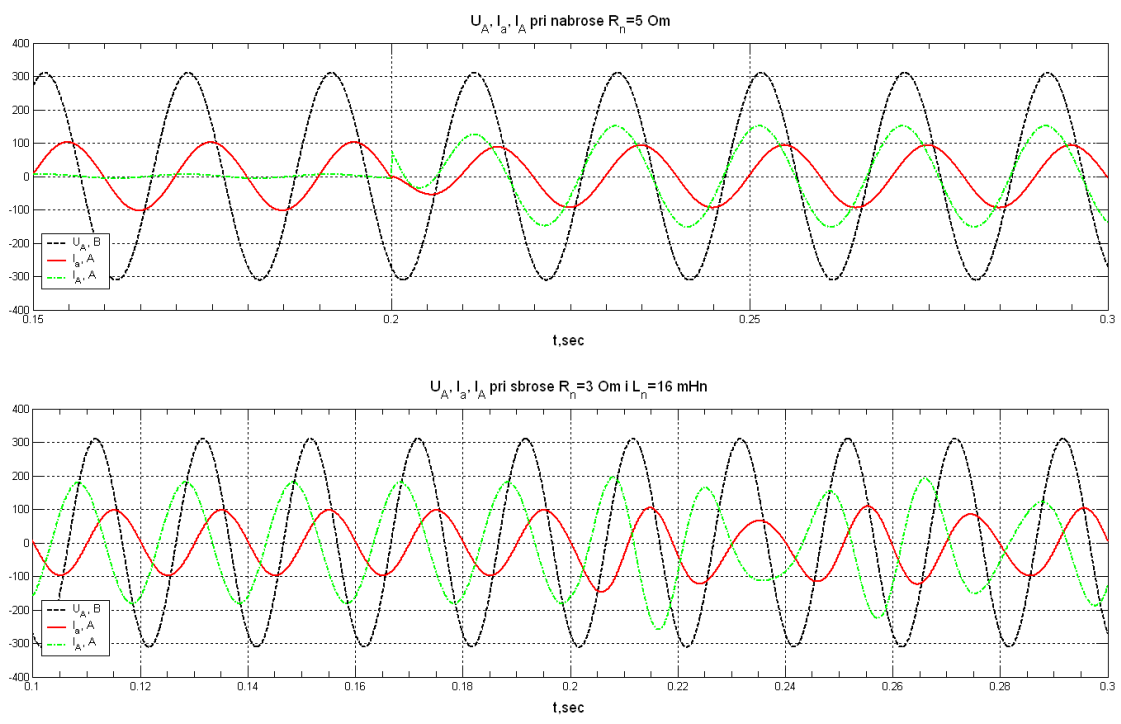


Рисунок 6 – Переходные процессы сброса и наброса нагрузки

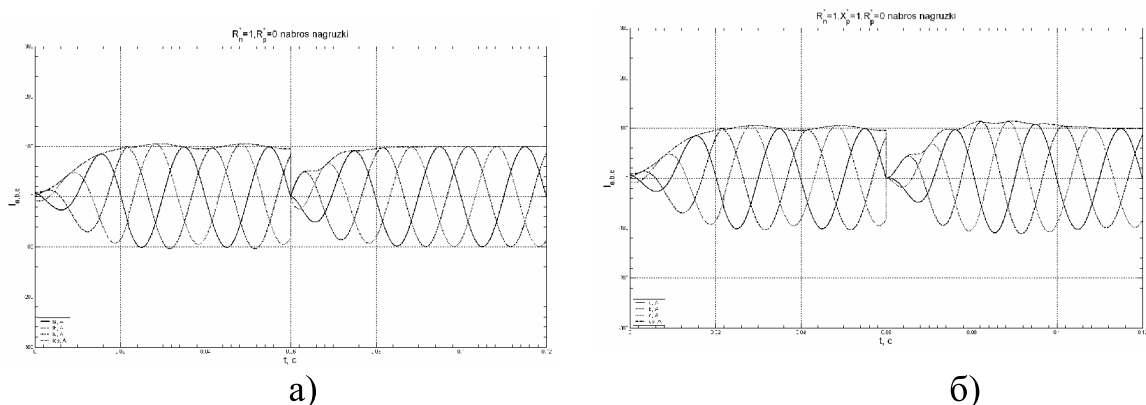


Рисунок 7 – Переходные процессы наброса нагрузки:
 а) активной; б) активно-индуктивной

Выводы.

1) ИЕП с выходом на переменном токе представляет собой динамическое звено 6-го порядка.

2) При активной нагрузке все переходные процессы по возмущению заканчиваются в течение одного периода сетевого напряжения, входные токи при этом совпадают с соответствующими сетевыми напряжениями – ИЕП электромагнитно совместим с сетью.

3) При активно-индуктивной нагрузке все процессы заканчиваются в течение 1,5-2 периодов, а ИЕП генерирует в сеть реактивную мощность индуктивного характера.

Библиографический список

1. Системы стабилизированного тока / сб. научн. трудов ИЭД НАНУ. – К.: Наукова думка, 1976. – 175 с.
2. Волков И.В. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях / И.В. Волков., В.Н. Исаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.
3. Анохин В.В. Модели динамических систем: технологии построения в MATLAB / Анохин В.В. // Математика в приложения. - 2003. - № 4(4). – С. 54-59.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Лущиком В.Д.