

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

СТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИСТОЧНИКОВ ТОКА НА БАЗЕ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Наведені результати теоретичних досліджень статичних характеристик індуктивно-ємнісного перетворювача з виходом на постійному та змінному струмі, отримані зовнішні характеристики та залежності напруг на реакторах та конденсаторах від навантаження.

***Ключові слова:** індуктивно-ємнісний перетворювач, джерело струму, векторна діаграма, статичні характеристики.*

Приведены результаты теоретических исследований статических характеристик индуктивно-емкостного преобразователя с выходом на постоянном и переменном токе, получены внешние характеристики и зависимости напряжений на реакторах и конденсаторах от нагрузки.

***Ключевые слова:** индуктивно-емкостной преобразователь, источник тока, векторная диаграмма, статические характеристики*

Особый класс источников тока (ИТ) составляют электромагнитные преобразователи напряжения переменного тока неизменной амплитуды и частоты в стабильный переменный ток постоянной частоты с использованием явлений резонансов напряжения и тока. Это так называемые индуктивно-емкостные преобразователи (ИЕП). Они обладают весьма существенным достоинством – коэффициентом мощности, близким к единице при хороших массогабаритных показателях [1].

Это обстоятельство становится весьма актуальным в современных условиях засоренности электрических сетей реактивной энергией. Использование таких преобразователей при построении быстродействующих электроприводов поможет решить проблему электромагнитной совместимости питающих сетей и потребителей.

Постановка задачи исследования. Цель работы – углублённое изучение процессов в источниках тока на базе ИЕП для применения их в быстродействующих регулируемых электроприводах (ЭП) постоянного и переменного тока.

Исследование индуктивно-емкостного преобразователя с выходом на переменном токе. Среди множества схемных решений таких ИЕП [1] наибольшее применение получила схема Штейнметца, изображённая на рисунке 1.

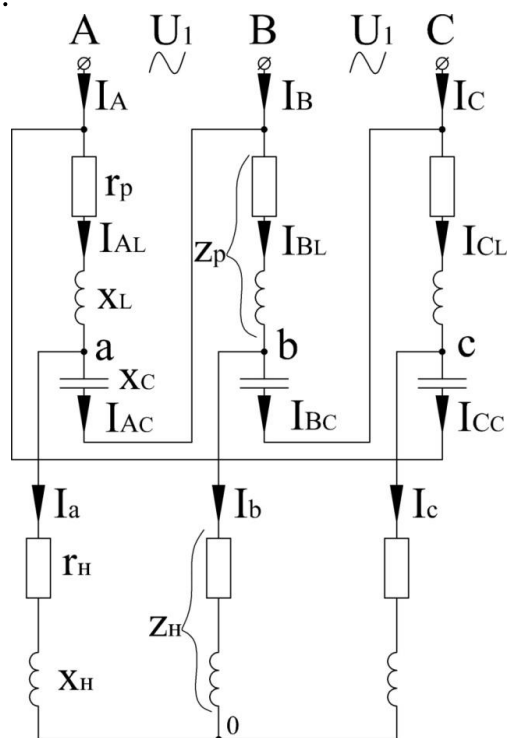


Рисунок 1 – ИЕП по схеме Штейнметца

Она придаёт преобразователю ряд известных достоинств, среди которых следует отметить в первую очередь высокое значение коэффициента мощности и отсутствие входного тока (потребляемого ИЕП из сети) в режиме холостого хода.

Уравнения проходных характеристик ИЕП с выходом на переменном токе (по трём каналам для случая активно-индуктивной нагрузки):

$$\begin{aligned}
 \dot{i}_a &= \left[\frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_A \left(1 + \frac{\dot{Z}_p}{\dot{X}_c} \right)}{\dot{Z}_H} \frac{\dot{Z}_p}{\dot{Z}_p \dot{X}_c + \dot{Z}_H (\dot{Z}_p + \dot{X}_c)} \right] \\
 \dot{i}_b &= \left[\frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_B \left(1 + \frac{\dot{Z}_p}{\dot{X}_c} \right)}{\dot{Z}_H} \frac{\dot{Z}_p}{\dot{Z}_p \dot{X}_c + \dot{Z}_H (\dot{Z}_p + \dot{X}_c)} \right] \\
 \dot{i}_c &= \left[\frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_C \left(1 + \frac{\dot{Z}_p}{\dot{X}_c} \right)}{\dot{Z}_H} \frac{\dot{Z}_p}{\dot{Z}_p \dot{X}_c + \dot{Z}_H (\dot{Z}_p + \dot{X}_c)} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

где r_p, r_n, T_p, T_n – величины активных сопротивлений и электромагнитных постоянных времени реакторов (дросселей) и нагрузки ($T_p = L_p / r_p, T_n = L_n / r_n$);

L_p, L_n – величины индуктивностей реактора и нагрузки;

C – величина ёмкости конденсаторов;

ω – круговая частота напряжения сети;

U_m – амплитудное значение фазного напряжения

$\dot{Z}_p, \dot{Z}_n, \dot{X}_c$ – величины сопротивлений реактора, нагрузки и конденсатора в комплексной форме.

$$\begin{aligned}\dot{Z}_p &= \sqrt{r_p^2 + x_p^2} e^{j\varphi_p} = r_p + jx_p; \\ \dot{Z}_n &= \sqrt{r_n^2 + x_n^2} e^{j\varphi_n} = r_n + jx_n; \\ \dot{X}_c &= -jX_c,\end{aligned}\tag{2}$$

где $\varphi_p = \text{arctg}(x_p / r_p)$; $\varphi_n = \text{arctg}(x_n / r_n)$.

В идеальном случае ($r_p = 0, X_L = X_C, Z_n = 0$) величина выходного тока равна (действующее значение):

$$I_{2\text{нач}} = \frac{U_m \sqrt{3}}{\sqrt{2} X_C} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{U_m}{X_C}\tag{3}$$

В качестве базисного сопротивления принято $Z_\phi = X_C$, а тока – $I_{2\text{нач}}$.

При хорошей добротности реакторов ($D = x_p / r_p \geq 15 \div 20$) влиянием r_p можно пренебречь [1].

На рисунке 2 приведена векторная диаграмма ИЕП в общем случае с активно-индуктивной нагрузкой значительной величины ($\dot{Z} \cong 3Z_\phi$).

Интерес представляет «деформация» векторной диаграммы при изменении как величины, так и характера нагрузки ($\dot{Z}_n = \text{var}$). При $Z_n = 0$, т.е. закорачивании нагрузки (наиболее благоприятный режим для ИЕП), точки a, b, c смещаются в точку «0» в центр треугольника линейных напряжений.

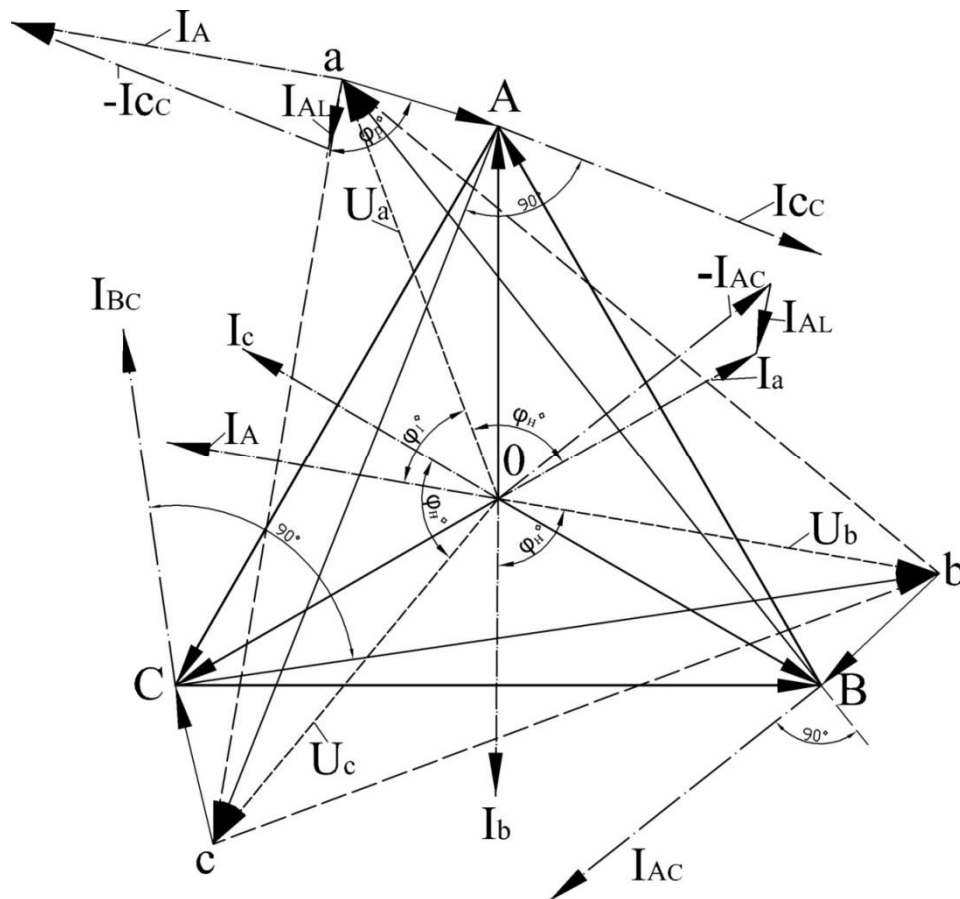


Рисунок 2 – Векторная диаграмма ИЕП при активно-индуктивной нагрузке значительной величины

Естественно, при увеличении Z_n эти точки «уходят» в стороны тт. A, B, C . Если нагрузка чисто активная ($x_n = 0$), то они идут в стороны точек опережающей фазы (т. «a» к т. «C», «b» – к «A», «c» – к «B»).

При обрыве цепи нагрузки ($Z_n \rightarrow \infty$ – аварийный режим для ИЕП) т. a, b, c уходят в ∞ по векторам фазных напряжений сети: «a» по $0-C$; «b» по $0-A$; «c» по $0-B$. Напряжения на реактивных элементах ИЕП резко увеличиваются $U_L = U_C \rightarrow \infty$ и находятся в противофазе (резонанс напряжений).

При активно-индуктивной нагрузке увеличение Z_n приводит к движению указанных точек из т. «0» в сторону вершин «своих» фаз треугольника линейных напряжений сети («a» к «A», «b» к «B», «c» к «C»). При $Z_n \rightarrow \infty$ эти точки устремляются в ∞ от них по линиям линейных напряжений: «a» по U_{AB} , «b» по U_{BC} , «c» по U_{CA} .

В случае активно-емкостной нагрузки ($x_n \gg r_n$) указанные выше точки из т. «0» уходят в сторону вершин треугольника линейных напряжений сети отстающих фаз: т «a» к «B», «b» к «C», «c» к «A» и при обрыве цепей нагрузки – от этих точек в ∞ , приближаясь в пределе к линиям линейных напряжений.

Подчеркнём, что при $Z_n = 0$ в ИЕП образуются две «звезды», с параллельно включенными реактором и конденсатором, параметры которых настроены на резонанс токов. При $r_p = 0$ мощность из сети ИЕП не потребляет, входной ток равен $I_1 = 0$.

На рисунке 3 показаны зависимости выходного тока (модуля) ИЕП $I_2 = |I_a| = |I_b| = |I_c|$ от величины сопротивления нагрузки Z_n активного и индуктивного характера при учёте неидеальности реактора ($r_p \neq 0$). Как видно из них, величина выходного тока уменьшается как от величины отбираемой мощности ($Z_n = var$), так и активного сопротивления обмотки реактора r_p .

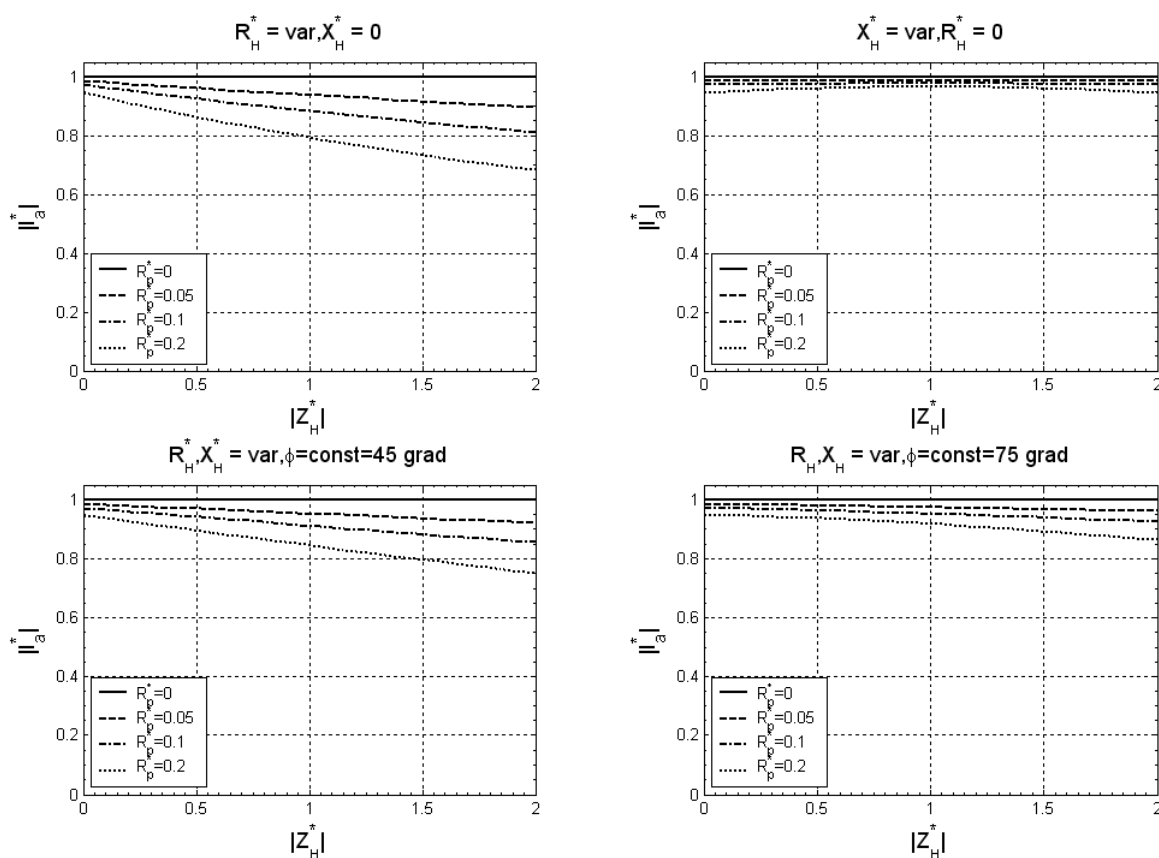
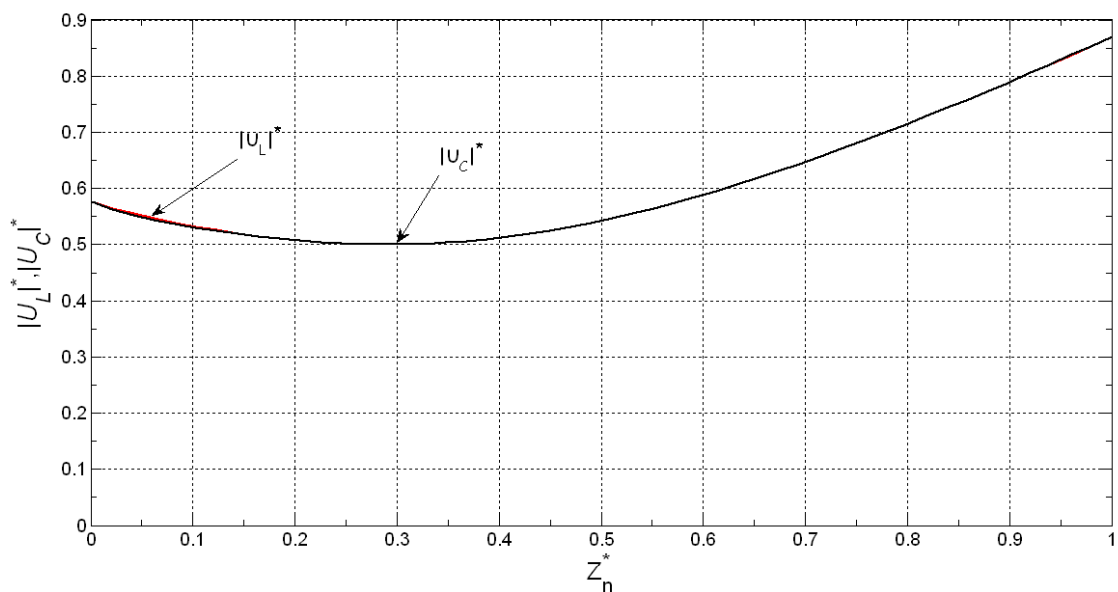
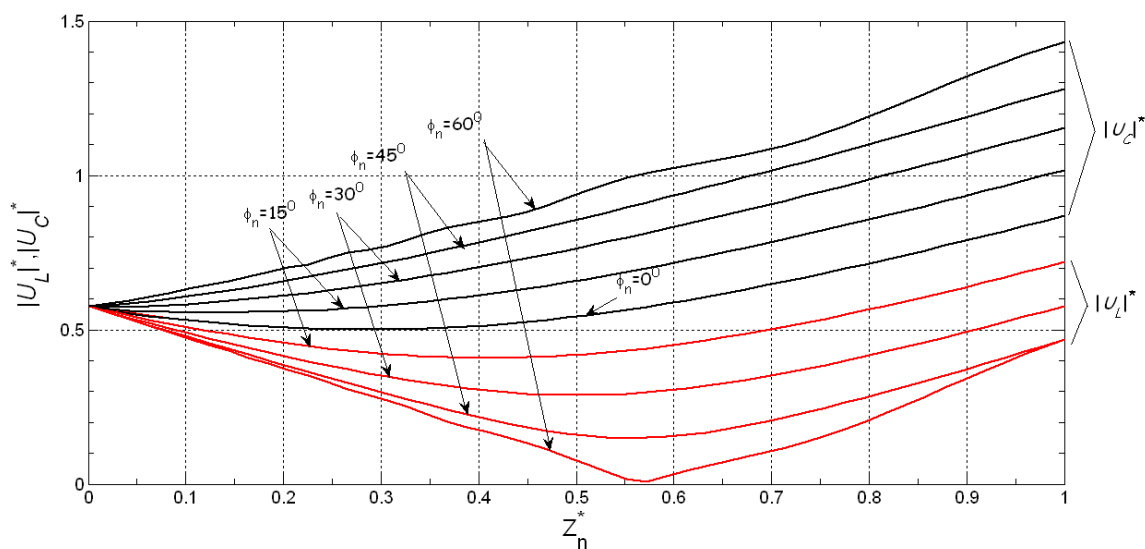


Рисунок 3 – Зависимости выходного тока (модуля) ИЕП $I_2 = |I_a| = |I_b| = |I_c|$ от величины сопротивления нагрузки Z_n

На рисунке 4 представлены напряжения на реакторах и конденсаторах ИЕП при различных нагрузках. Для активной нагрузки зависимости $|U_L| = f(r_n^*)$ и $|U_C| = f(r_n^*)$ совпадают, т.е. реактивные элементы контура при чисто активной нагрузке можно выбирать на одинаковое напряжение. При активно-индуктивной нагрузке при увеличении угла нагрузки напряжение на конденсаторах возрастает, а на реакторах падает и при значении нагрузки $Z_n^* \approx 0,57$ равняется практически нулю.



а)



б)

Рисунок 4 – Зависимости напряжения на реакторах и конденсаторах ИЕП

а) при увеличении активной нагрузки от $Z_n^* = 0$ до $Z_n^* = 1$;

б) при различных углах и увеличении нагрузки от $Z_n^* = 0$ до $Z_n^* = 1$

Исследование ИЕП с выходом на постоянном токе. Нагрузкой ИТ являются якорные (роторные) обмотки двигателей постоянного тока (асинхронных машин). r_d и L_d представляют собой приведенные к цепи выпрямленного тока активные сопротивления и индуктивности асинхронной машины или якорной обмотки двигателя постоянного тока. e_d – это э.д.с. вращения якорной обмотки или выпрямленная э.д.с. роторной.

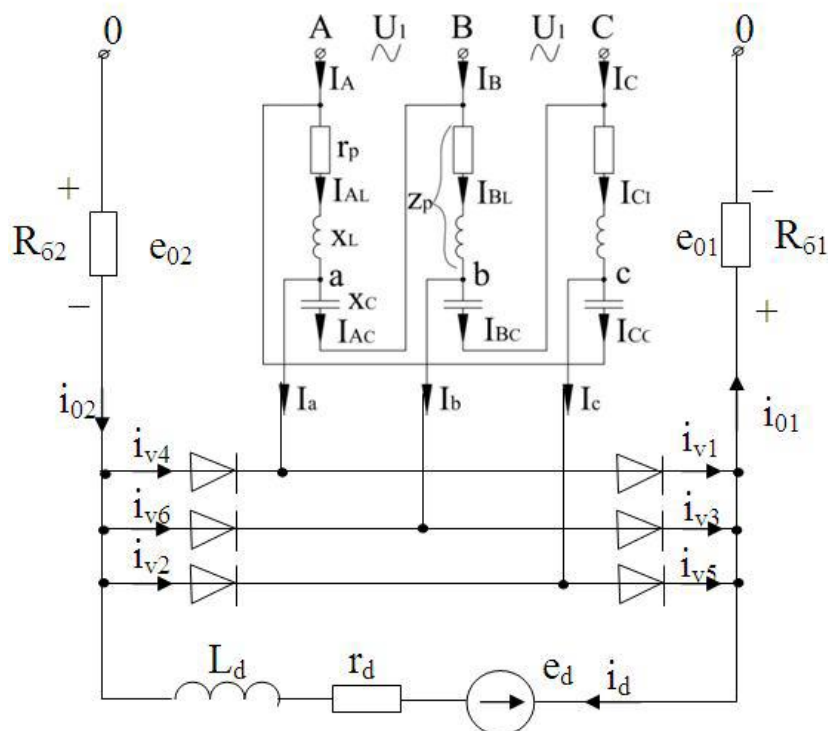


Рисунок 5 – Принципиальная схема источника постоянного тока

Внешние характеристики $I_d=f(r_d^*, r_p^*)$ такого источника тока представлены на рисунке 6,а. Как видно, источник с приемлемой точностью поддерживает уровень выходного тока даже при реальных параметрах реакторов ($r_p^* \leq 0,1$), особенно если учесть последующее регулирование и стабилизацию на разных уровнях этого тока с помощью регулятора. Регулирование выпрямленного тока i_d осуществляется шунтированием цепи нагрузки быстродействующим ключевым элементом, например IGBT-транзистором, управляемым релейным регулятором тока или широтно-импульсным модулятором. Внешние характеристики такого ИТ с релейным регулятором приведены на рисунке 6,б. При отсутствии у не-

го зоны нечувствительности имеем астатическое регулирование выходного тока в очень широком диапазоне.

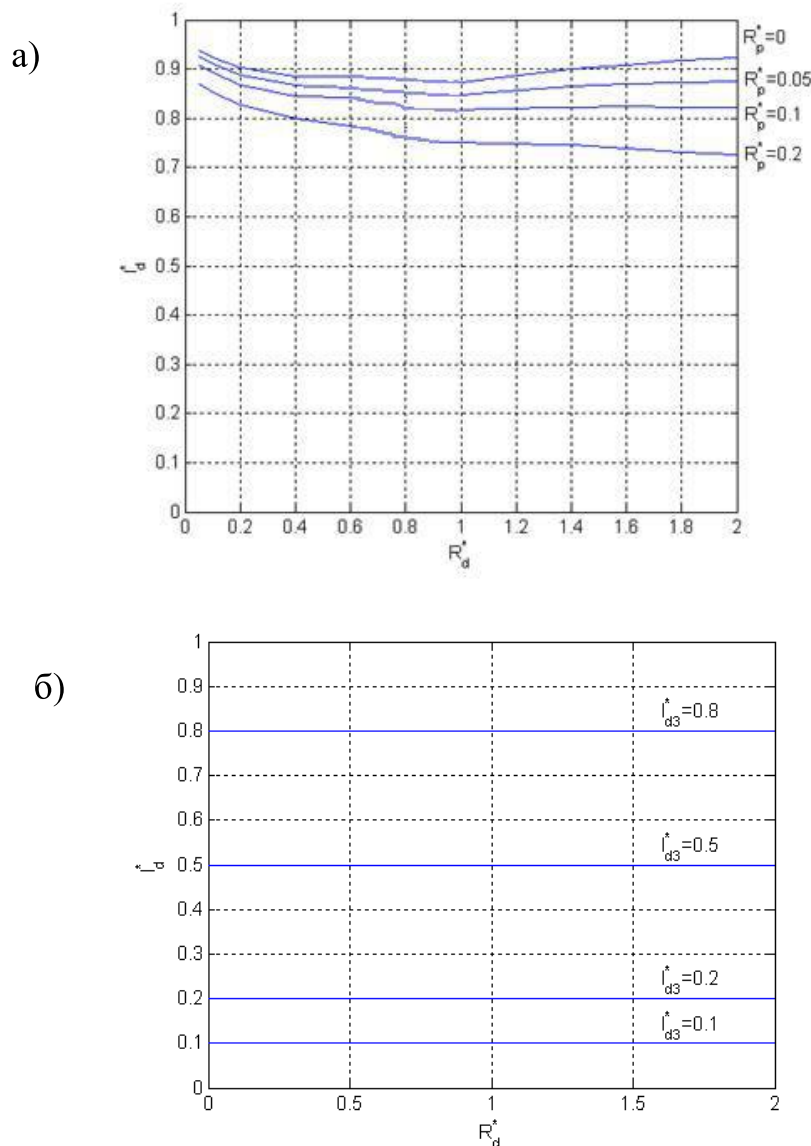


Рисунок 6 – Внешние характеристики источника постоянного тока: а) нерегулируемого; б) регулируемого

На рисунке 7 представлены напряжения на реакторах и конденсаторах ИЕП при различных нагрузках. Для активной нагрузки зависимости $|U_L| = f(r_n^*)$ и $|U_C| = f(r_n^*)$ не совпадают. Напряжение на реакторах при увеличении r_n^* возрастает, а на конденсаторах имеет экстремальный характер с минимумом при $r_n^* = 0,65$ и составляет 0,36 базового напряжения. Таким образом, при выборе элементов ИЕП с выпрямителем реакторы должны выбираться на большее напряжение.

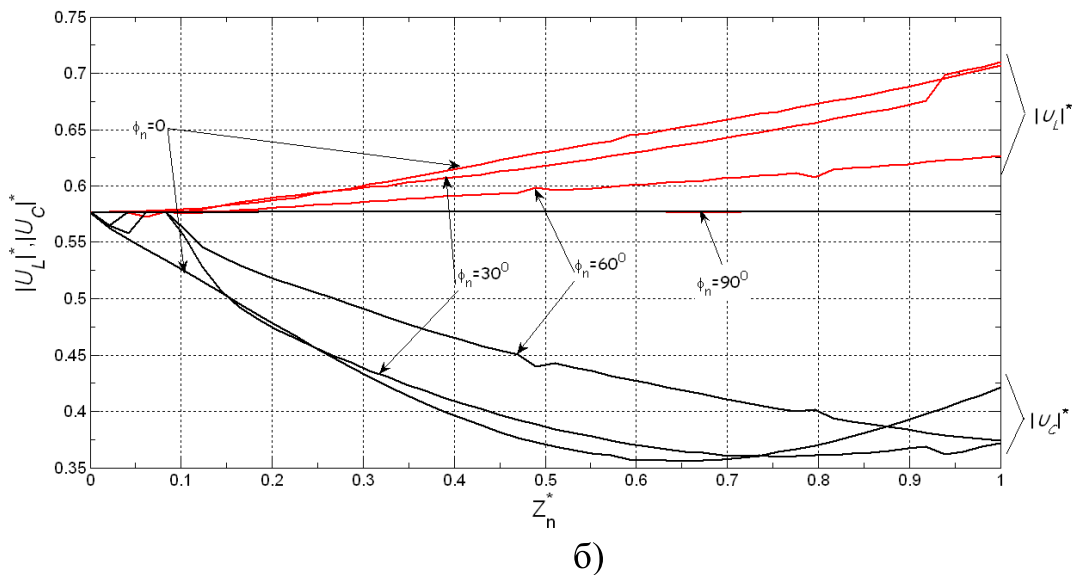
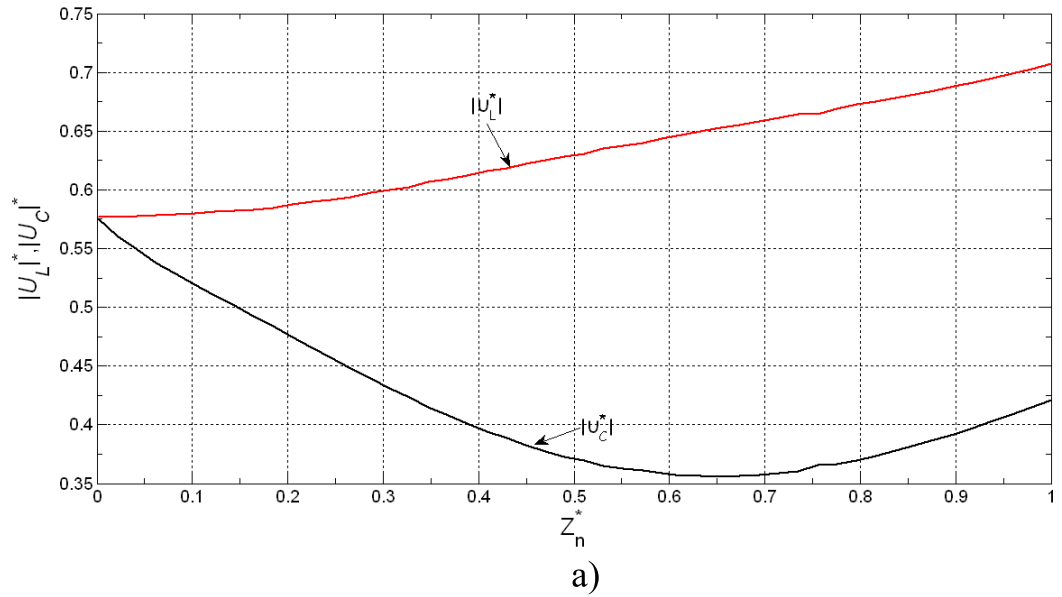


Рисунок 7 – Зависимости напряжения на реакторах и конденсаторах ИЕП при различных углах нагрузки и её увеличении от $Z_n^* = 0$ до $Z_n^* = 1$: а) для чисто активной нагрузки; б) для нагрузки с различными углами

Выводы.

1) Ошибка в естественной стабилизации выходного тока ИЕП при номинальной активной нагрузке и реальных обмотках дросселей не превышает $0,08 I_{xx}$ и уменьшается с увеличением угла нагрузки.

При работе на активную нагрузку реактивные элементы ИЕП (дроссели и конденсаторы) могут выбираться на одинаковое рабочее напряжение, равное напряжению питающей сети.

2) При работе на активно-индуктивную нагрузку рабочие напряжения для дросселя и конденсатора должны быть разными: для дросселей – до $1.5U_c$, а конденсаторов – до U_c .

3) Ошибка в естественной стабилизации выходного постоянного тока не превышает $0,05 I_{xx}$ даже при реальных параметрах реактивных элементов ИЕП.

4) Использование ключевых элементов позволяет строить быстродействующие регулируемые источники постоянного тока с высоким коэффициентом мощности, которые могут служить базой для построения электропривода постоянного и переменного тока.

Библиографический список

1. *Системы стабилизированного тока / сб. научн. трудов ИЭД НАНУ. – К.: Наукова думка, 1976. – 175 с.*

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