

## АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПИТАНИИ ЕГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ СЕТИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

*Захарченко П.И., ОАО «Первомайский электромеханический завод им. К. Маркса»,  
Ковалев Е.Б., Толочко О.И., Чекавский Г.С.*

*Донецкий национальный технический университет  
gleb@elf.dgtu.donetsk.ua*

*The electric system, in which induction drive motor gets feed by means of non-ideal power circuit with non-zero longitudinal resistance, has been considered. The method of analysis of static and dynamic characteristics of induction electric drive has been expounded. The way of determination of the quantitative coefficients of the power supply influence on induction motor work either in steady-state or in transient modes has been achieved.*

### Введение

Известно [1 и др.], что в электрических системах (ЭС), содержащих асинхронные двигатели (АД), мощность которых соизмерима с мощностью системы, устойчивость может нарушаться и при нормальных с точки зрения эксплуатации режимах, например, при штатных прямых пусках АД, составляющих основную часть нагрузки системы, а также при резких изменениях момента нагрузки АД. К таким ЭС можно отнести системы для сельского хозяйства, передвижные электростанции для снабжения строительных комплексов, лесоперерабатывающих заводов, шахтных и открытых рудных выработок, а также изолированные ЭС различного назначения.

Нарушение устойчивости в указанных случаях происходит из-за снижения напряжения на зажимах АД, которое имеет место вследствие увеличения потерь напряжения в питающей сети. Сказанное в определенной мере имеет место и в случаях питания мощных синхронных двигателей от сети ограниченной мощности, асинхронный пуск которых осуществляется непосредственно подключением их к сети.

Следовательно, одним из наиболее эффективных и поэтому целесообразных путей обеспечения сохранения устойчивости работы АД является применение мероприятий, направленных на снижение влияния питающей сети на работу двигателя в установившихся и особенно в переходных режимах работы.

### Цель и задачи исследований

Целью исследований является определение влияния питающей сети на статические и динамические характеристики асинхронного электропривода (ЭП) в различных режимах работы двигателя.

Для достижения сформулированной цели необходимо определить количественные показатели влияния сети: 1) на снижение напряжения на зажимах АД и электромагнитного момента двигателя в различных режимах работы (при определенном скольжении двигателя); 2) на частоту изменения и интенсивность затухания свободных составляющих переходных токов и электромагнитного момента АД в течение протекания переходного процесса, вызванного подключением ЭП к сети или изменением напряжения источника питания; 3) на начальные значения свободных составляющих токов и электромагнитного момента АД.

### Объект исследований

Рассматривается ЭС, состоящая из трехфазного источника питания промышленной частоты, непосредственно сети и трехфазного низковольтного АД, которым приводится в работу некоторый рабочий механизм. Под источником питания понимается условная точка ЭС, напряжение в которой, в зависимости от топологии системы электроснабжения технологического комплекса, можно считать неизменным (шины высшего напряжения, распределительный щит предприятия или др.). Питающая сеть включает в себя непосредственно распределительную сеть (кабельная, воздушная линия, шинопровод, или их сочетание), к концу которой присоединен исполнительный АД, а также все другие элементы, расположенные между источником питания и зажимами двигателя (прочие участки сети, переходные сопротивления трансформаторов, внутреннее сопротивление источника питания и т.д.). Предполагается, что все элементы системы симметричны.

В качестве примера рассмотрим ЭС (рис. 1). Напряжение  $U_1$  посредством понижающего трансформатора (РТ) и цеховой распределительной сети передается на шины низкого напряжения  $U_S$ , от которых осуществляется питание низковольтного трехфазного АД, а также вспомогательного технологического оборудования, суммарная мощность которого много меньше мощности АД (диапазон рассматриваемых мощностей АД – 50...300 кВт). Амплитуду напряжения высоковольтной сети можно считать постоянной, если пренебречь потерями напряжения в ней по сравнению с потерями напряжения в сети низшего напряжения. Питающая сеть в этом случае включает в себя РТ и распределительную сеть. Ставится задача количественного определения влияния питающей сети на работу АД.

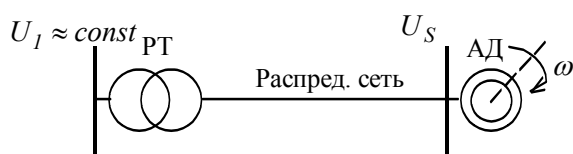


Рисунок 1 – Схема электрической системы

### Схема замещения электропривода

Эквивалентные схемы замещения используются для расчета и анализа установившихся режимов работы исследуемого объекта, однако могут быть применены и к анализу динамических процессов в объекте.

При составлении схемы замещения асинхронного ЭП, получающего питание посредством сети с ненулевыми продольными сопротивлениями, целесообразно принять следующие допущения: 1) машина симметрична, параметры обмотки ротора приведены к обмотке статора; 2) не учитывается энергия электростатического поля (емкости между обмотками АД); 3) потерями в стали статора и ротора АД можно пренебречь; 4) взаимдуктивностью фаз питающей сети можно пренебречь; 5) токи утечки в сети отсутствуют.

Первые три допущения относятся к допущениям, обычно принимаемым для идеализированного неявнополюсного АД [2]. Принимая во внимание диапазон рассматриваемых мощностей АД, требуют учета явления насыщения магнитопровода, а также эффекта вытеснения тока в роторе. Для учета указанных факторов может быть применена методика [3], если АД работает исключительно в двигательном режиме. Последние два допущения не вносят существенной погрешности для сетей рассматриваемых напряжений и протяженностей [1].

С целью получения более общих результатов исследования выполнены в системе относительных единиц с ориентацией на переменные цепи статора и электромагнитную мощность АД [2].

С учетом принятых допущений схема замещения асинхронного электропривода имеет вид:

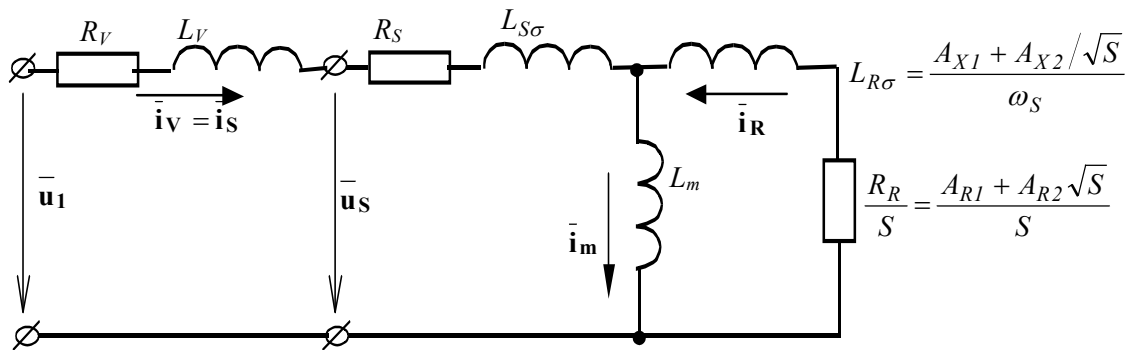


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения объекта исследований

Напряжения и токи участков схемы показаны как результирующие комплексные векторы. Кроме того, на схеме рис.2 обозначено:  $R_V, L_V$  – эквивалентные продольные параметры питающей сети (суммарные приведенные к статору АД сопротивление и индуктивность всех элементов, расположенных между источником питания и зажимами АД);  $R_S, R_R, L_{S\sigma}, L_{R\sigma}, L_m$  – соответственно активные сопротивления статора и ротора, индуктивные сопротивления рассеяния обмоток статора и ротора, взаимдуктивность АД;  $A_{R1}, A_{R2}, A_{X1}, A_{X2}$  – коэффициенты регрессии, определяемые по [3];  $\omega_S = 1$  – угловая частота напряжения источника питания, равная промышленной;  $S$  – скольжение АД.

В соответствии с поставленными задачами исследований продольные параметры питающей сети удобно представить в следующем виде:

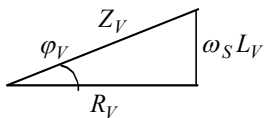


Рисунок 3 – Треугольник сопротивлений питающей сети

$$R_V = Z_V \cos \varphi_V, L_V = \frac{Z_V}{\omega_S} \sin \varphi_V, \quad (1)$$

где  $Z_V$  – полное продольное сопротивление питающей сети;  $\varphi_V$  – угол между активной составляющей и полным сопротивлениями сети (рис.3), характеризующий соотношение активной и индуктивной составляющих в полном сопротивлении.

### Статические характеристики электропривода

Для количественного анализа влияния питающей сети на работу АД будем считать, что амплитуда напряжения питающей сети равна базовому напряжению:  $\bar{u}_S = 1$ . Для качественного и количественного анализа влияния питающей сети на работу АД достаточно двух характеристик – зависимости напряжения на зажимах АД в долях напряжения источника питания (рис.4) и коэффициента мощности ЭП в функции скольжения.

Исследования выполнены на примере АД типа ВАО2-280L-8 с такими параметрами схемы замещения:

$$R_S = 0,017; L_{S\sigma} = 0,114; L_m = 2,621; R_R = 0,010 + 0,044\sqrt{S}; L_{R\sigma} = 0,084 + 0,012/\sqrt{S}. \quad (2)$$

Анализ характеристик (рис.4) показывает: 1) потери напряжения в питающей сети, следовательно, отклонение электромагнитного момента АД от его значения на естественной характеристике зависят как от значения полного сопротивления питающей сети, так и от соотношения ее параметров; 2) в зоне высоких скольжений (выше критического) напряжение на зажимах АД мало зависит от скольжения.

Поскольку активное сопротивление АД обычно весьма мало по сравнению с индуктивным, реактивная составляющая сопротивления питающей сети, в отличие от активной, практически не оказывает влияния на коэффициент мощности ЭП ввиду ее малости по сравнению с соответствующим сопротивлением АД.

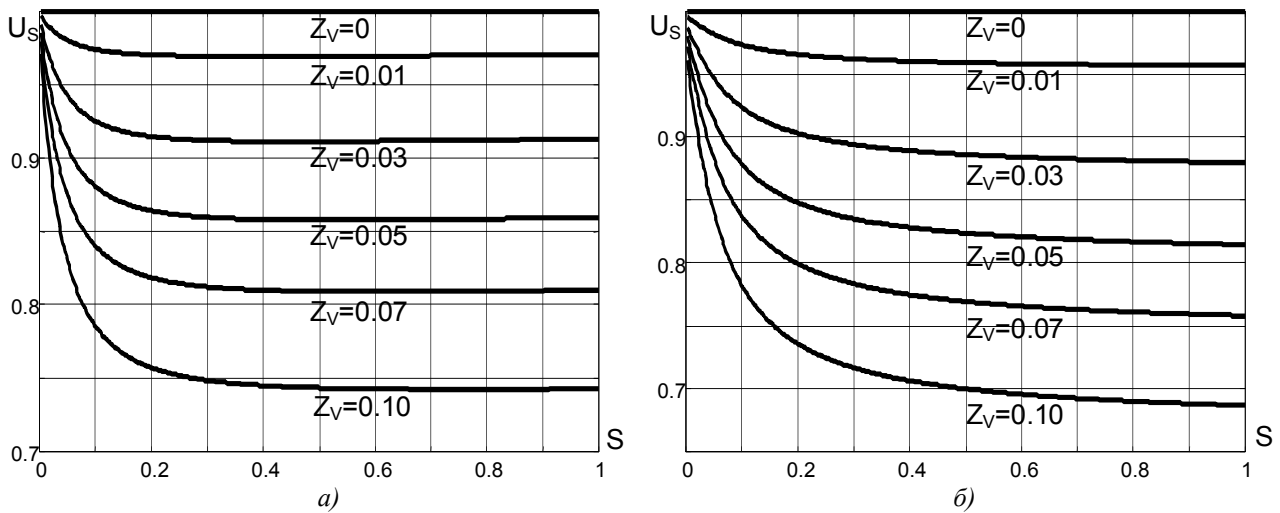


Рисунок 4 – Статические характеристики асинхронного электропривода в случаях, когда в сети преобладает активная ( $\varphi_V = 0,4$ ) (а) и индуктивная ( $\varphi_V = 1,2$ ) (б) составляющая сопротивления

Для анализа зависимости напряжения на зажимах АД от полного сопротивления и от соотношения составляющих питающей сети определены зависимости напряжения на зажимах АД  $U_S$  в функции угла сети  $\varphi_V$  при разных значениях сопротивления сети  $Z_V$  для режима пуска ( $S = 1$ ) и для критической точки ( $S = S_{KP}$  на естественной характеристике), показанные соответственно на рис. 5 и 6. Эти кривые характеризуют соответственно устойчивость (успешность) пуска и устойчивость нормальной (штатной) работы ЭП.

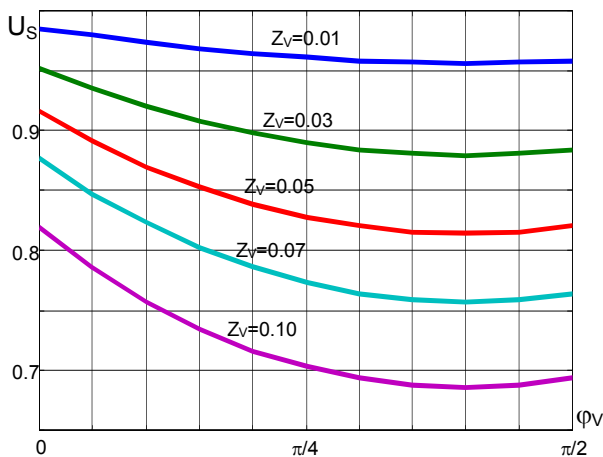


Рисунок 5 – Зависимости напряжения на зажимах АД в долях напряжения источника питания в режиме пуска

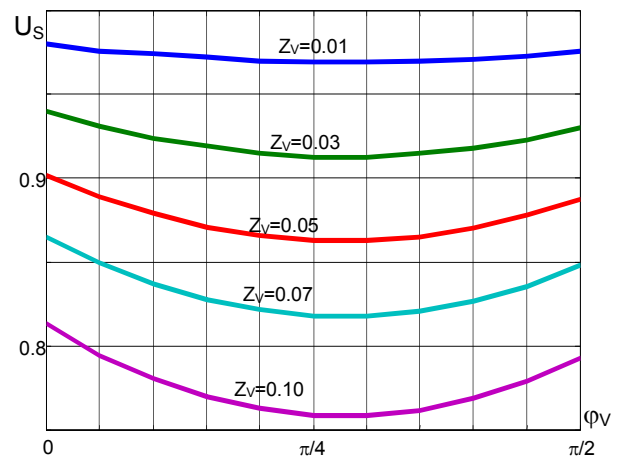


Рисунок 6 – Зависимости напряжения на зажимах АД в долях напряжения источника питания для критической точки

Из рис.5 следует, что пуск будет тем менее устойчивым, чем больше преобладание индуктивной составляющей в полном сопротивлении питающей сети, значение которого фиксировано. Из рис.6 следует, что при фиксированном значении полного сопротивления питающей сети АД будет иметь минимальную перегрузочную способность по критическому моменту при равных долях активной и индуктивной составляющих в полном сопротивлении сети.

### Динамические свойства электропривода

Традиционно в общем случае при математическом описании переходных процессов в электрических машинах используются системы нелинейных дифференциальных уравнений (ДУ) с переменными коэффициентами, оперирующие с комплексными векторами [2, 4 – 6 и др.]. Известно также [4, 5 и др.], что аналитическое решение таких систем ДУ относительно просто можно получить, если частоту вращения ротора машины  $\omega$  считать неизменной или изменяющейся по известному закону. Исходные ДУ при этом становятся линейными, хотя и с переменными коэффициентами. При этом, помимо линеаризации системы ДУ, обычно прибегают к некоторым дополнительным допущениям (например, пренебрежение [4] или упрощенный учет [5] активного сопротивления статора), что позволяет существенно упростить аналитическое решение, но вместе с тем вносит определенную погрешность. Кроме того, в научной литературе встречаются недопустимые неточности [6].

Традиционно используемая методика может быть применена и к анализу относительно несложных электрических систем, содержащих электрические машины [4]. Исходные ДУ, связывающие напряжения и токи

рассматриваемого объекта (рис.2), в ортогональной системе координат  $\alpha, \beta, \theta$  могут быть записаны в таком виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{u}}_1 &= \bar{\mathbf{u}}_S + (L_V + L_S) \frac{d\bar{\mathbf{i}}_S}{dt} + (R_V + R_S) \bar{\mathbf{i}}_S + L_m \frac{d\bar{\mathbf{i}}_R}{dt}; \\ 0 &= \bar{\mathbf{i}}_R R_R + L_R \frac{d\bar{\mathbf{i}}_R}{dt} + L_m \frac{d\bar{\mathbf{i}}_S}{dt} - j\omega L_R \bar{\mathbf{i}}_R - j\omega L_m \bar{\mathbf{i}}_S, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $L_S = L_m + L_{S\sigma}$ ,  $L_R = L_m + L_{R\sigma}$  – полные индуктивности обмоток статора и ротора.

Уравнения (3) известны ([4, 7 и др.]), однако достаточно полного исследования динамических свойств асинхронного ЭП проведено не было. Данная работа, в частности, ставит своей целью несколько восполнить этот пробел применительно к рассматриваемому объекту. Отметим, что используемая нами методика определения параметров АД [3] не усложняет математического описания объекта, но вместе с тем обеспечивает высокую точность. Аналитические выражения для напряжений и токов переходного процесса могут быть получены с помощью наиболее полного (с учетом всех параметров объекта) точного аналитического решения системы уравнений (3), линеаризованной предположением  $\omega = const$ . Это позволит сделать вывод о влиянии (или отсутствии влияния) отдельных составляющих переходных величин уже после того, как они количественно будут определены. Решение будет тем более точным, чем выше суммарный момент инерции АД и механизма. При этом следует учитывать, что переменные параметры ротора АД определяются по методике [3] и соответствующим аналитическим выражениям (см. рис.2).

Характеристическое уравнение системы (3) имеет вид:

$$p^2 + \left( \alpha_V + \frac{\alpha_R}{\sigma_V} - j\omega \right) p + \alpha_V (\alpha_R - j\omega) = 0, \quad (4)$$

где  $\alpha_R = \frac{R_R}{L_R}$  – коэффициент затухания ротора АД;  $\alpha_V = \frac{R_V + R_S}{L_V + \sigma L_S}$  – коэффициент затухания сети с учетом

параметров статора АД;  $\sigma_V = \frac{L_V + \sigma L_S}{L_V + L_S}$  – отношение индуктивности сети и статора АД с учетом рассеяния к

суммарной индуктивности сети и статора;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R}$  – коэффициент рассеяния АД.

Корни характеристического уравнения (4) могут быть вычислены по формуле:

$$p_{1,2} = - \left( \frac{\alpha_V}{2} + \frac{\alpha_R}{2\sigma_V} - j \frac{\omega}{2} \right) \pm \sqrt{\left( \frac{\alpha_R}{2\sigma_V} - \frac{\alpha_V}{2} - j \frac{\omega}{2} \right)^2 + \alpha_V \alpha_R \left( \frac{1}{\sigma_V} - 1 \right)} = -\alpha_{1,2} + j\omega_{1,2} \quad (5)$$

Действительные части корней (5) характеризуют интенсивность затухания соответствующих свободных составляющих токов, а мнимые – свободную частоту их изменения.

Токи переходного процесса, кроме установившихся, будут иметь по две свободные составляющие:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mathbf{i}}_S &= \bar{\mathbf{i}}_{Sy} + \bar{A}_1 e^{p_1 t} + \bar{A}_2 e^{p_2 t}; \\ \bar{\mathbf{i}}_R &= \bar{\mathbf{i}}_{Ry} + \bar{B}_1 e^{p_1 t} + \bar{B}_2 e^{p_2 t}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\bar{\mathbf{i}}_{Sy} = \frac{\alpha_R + j(\omega_S - \omega)}{\omega_S (L_V + \sigma L_S) \left[ \omega - \omega_S + j\alpha_V + j \frac{\alpha_R}{\sigma_V} + \frac{\alpha_V}{\omega_S} (\alpha_R - j\omega) \right]} \bar{\mathbf{u}}_1; \quad (7)$$

$$\bar{\mathbf{i}}_{Ry} = \frac{jK_R (\omega - \omega_S)}{\alpha_R + j(\omega_S - \omega)} \bar{\mathbf{i}}_{Sy}; \quad (8)$$

$\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{B}_1, \bar{B}_2$  – комплексные числа (начальные значения свободных составляющих токов), определяемые из начальных условий и системы (3), записанной относительно свободных составляющих, например, с помощью следующего матричного уравнения:

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ R_S + R_V + (L_S + L_V)p_1 & 0 & L_m p_1 & 0 \\ 0 & L_m (p_2 - j\omega) & 0 & R_R + L_R (p_2 - j\omega) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{i}}_{S0} - \bar{\mathbf{i}}_{Sy}(0) \\ \bar{\mathbf{i}}_{R0} - \bar{\mathbf{i}}_{Ry}(0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где  $\bar{i}_{S0}$ ,  $\bar{i}_{R0}$  – значения токов статора и ротора на момент возникновения переходного процесса.

Электромагнитный момент АД определяется по формуле [2]:

$$M = \zeta_H L_m \operatorname{Im}[\bar{i}_S \bar{i}_R^*], \quad (10)$$

где  $\zeta_H = \frac{P_{\text{ЭМН}}}{S_H} = \frac{P_H - 3I_{SH}^2 R_S}{3U_{SH\phi} I_{SH}}$  – номинальный параметр АД.

Переходный электромагнитный момент имеет девять составляющих – установившуюся (обусловленную взаимодействием магнитных потоков, созданных установившимися токами статора и ротора), две аperiodические (от взаимодействия потоков, созданных свободными составляющими токов, изменяющимися с одинаковыми коэффициентами затухания и с одинаковой частотой) и шесть колебательных (от взаимодействия потоков, созданных установившимися токами и свободными составляющими другого тока или свободными составляющими токов, изменяющихся с разными коэффициентами затухания и с разными частотами).

Аperiodические составляющие момента создаются неподвижным в пространстве магнитным потоком, следовательно, являются тормозными. Колебательные составляющие момента отличаются по фазе на  $180^\circ$  и взаимно частично компенсируют друг друга, а также аperiodические моменты.

Поскольку аналитические выражения (6) токов переходного процесса могут быть определены с использованием (7) – (9), то для всех составляющих переходного момента (10) также могут быть найдены аналитические выражения. На основании приведенных уравнений может быть проведен анализ динамических свойств любого аналогичного объекта при любых значениях  $Z_V$  и  $\varphi_V$  (изменяются  $\alpha_V$ ,  $\sigma_V$ ).

В качестве примера на рис.7 показаны графики переходного процесса при подключении двигателя ВАО2-280L-8 с параметрами (2), питаемого от сети с параметрами  $Z_V = 0,04$ ,  $\varphi_V = 0,4$ , на номинальное напряжение. Кривые рассчитаны при условии, что частота вращения ротора АД постоянна и равна 0,4.

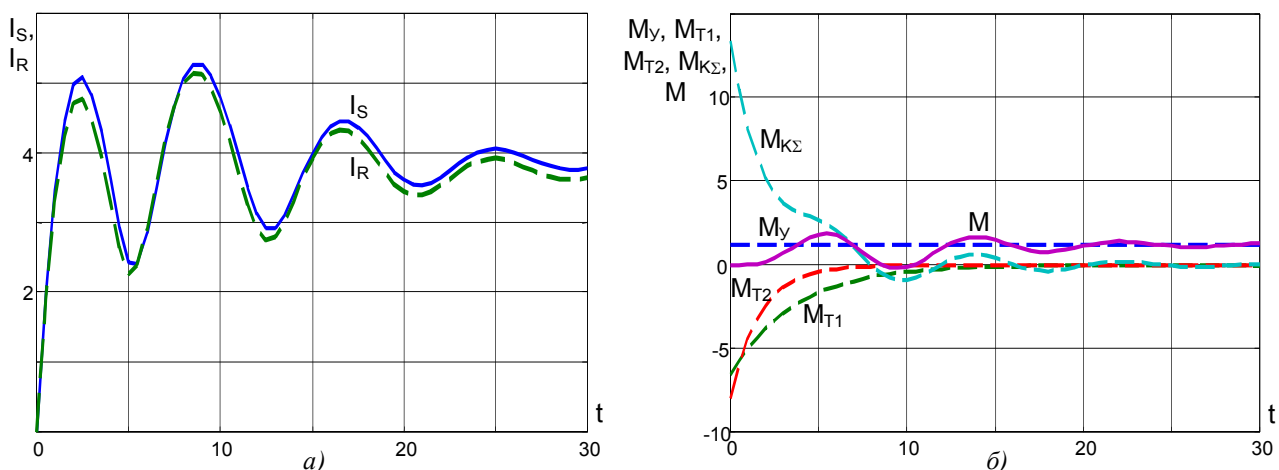


Рисунок 7 – Графики переходного процесса при подключении двигателя ВАО2-280L-8, питаемого от сети с параметрами  $Z_V = 0,04$ ,  $\varphi_V = 0,4$ , на номинальное напряжение ( $\omega = 0,4 = \text{const}$ )

Наибольший теоретический и практический интерес представляет анализ корней (5) характеристического уравнения (4), а также тормозные переходные моменты и сумма мгновенных значений колебательных составляющих, затухающих с одинаковой интенсивностью и изменяющихся с одинаковой частотой. Кроме того, большое практическое значение имеет определение продолжительности разгона (торможения) АД, т.е. времени протекания в сети повышенного тока, зависящей от суммарного момента инерции ЭП, что может быть выполнено путем совместного численного решения системы ДУ (3) и уравнения движения.

Анализ динамических свойств, проведенный с помощью описанных уравнений для ряда взрывозащищенных АД (на рис.8 приведен пример результатов), данные которых определялись по [3], позволил сделать следующие выводы, не отраженные в [4, 5]:

1) Свободные составляющие токов, затухающие с меньшей интенсивностью, могут изменяться как с большей, так и с меньшей частотой, в зависимости от параметров объекта и частоты вращения ротора АД, лежащей в диапазоне  $0 \leq \omega < 1$ . Граничным условием здесь является условие  $\omega = 0$ , а также условие равенства нулю мнимой части выражения под радикалом в (5) (перестановка корней характеристического уравнения при равенстве их действительных частей), которому соответствует следующее соотношение параметров объекта:

$$\alpha_R = \alpha_V \sigma_V. \quad (11)$$

Уравнение (11) является нелинейным (все параметры зависят от  $\omega$ ) и наиболее просто может быть решено методом последовательных приближений.

2) Полученные зависимости аperiodических и колебательных свободных моментов в зависимости от частоты вращения при разных сопротивлениях сети практически не зависят от значений и формы кривой установившегося момента в функции  $\omega$ . Начальные значения свободных токов и моментов, в зависимости от сопротивления сети, частоты вращения ротора АД и начальных условий, могут многократно превышать соответствующие установившиеся значения, что, тем не менее, не оказывают определяющего влияния на устойчивость переходного процесса.

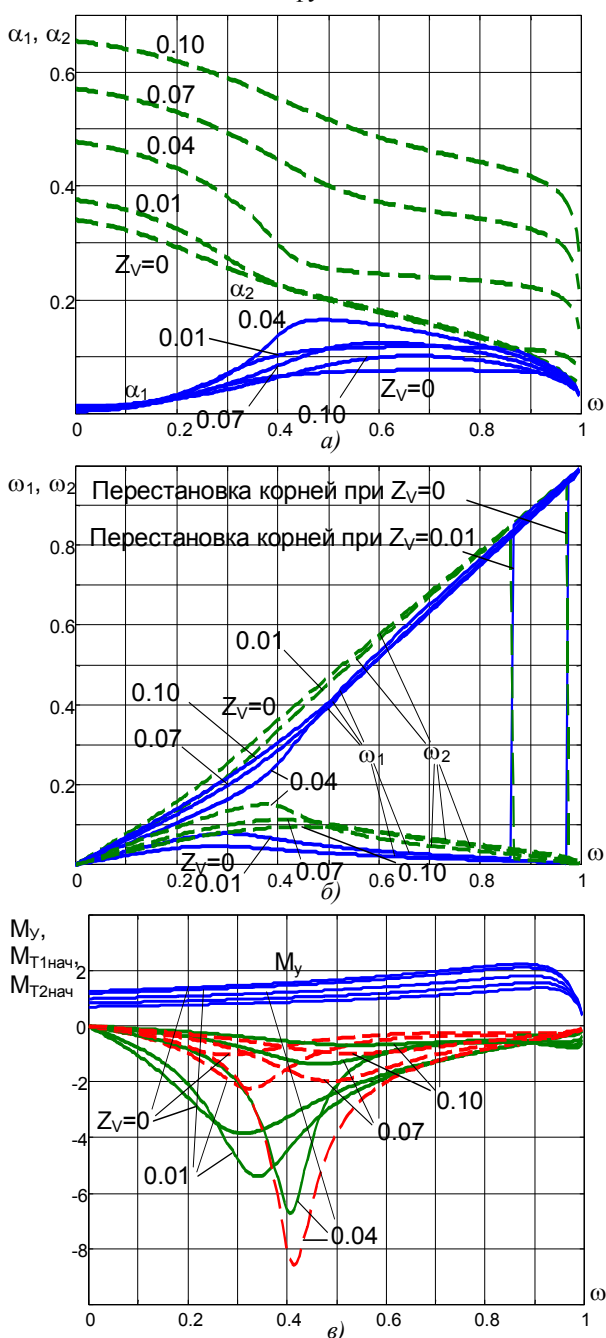


Рисунок 8 – Коэффициенты затухания (а), частоты изменения (б) свободных составляющих, начальные значения тормозных моментов (в) при питании АД ВАО2-280L-8 от сети ограниченной мощности

Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк, 1999. – С. 43 – 57.

4. Лайон В. Анализ переходных процессов в электрических машинах переменного тока методом симметричных составляющих / Пер. с англ. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 400 с.

5. Трещев И.И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 344 с.

6. Основы автоматизированного электропривода. Учеб. пособие для вузов / М.Г. Чиликин, М.М. Соколов, В.М. Терехов, А.В. Шинянский. – М.: «Энергия», 1974. – 348 с.

7. Ващенко А.П., Онищенко Г.Б. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Сер. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (Итоги науки и техники). М., ВИНТИ, 1988, №6. – С.1–96.

### Выводы

1. Одним из наиболее эффективных и целесообразных путей обеспечения устойчивости работы асинхронного двигателя ответственного механизма как в установившихся, так и в переходных режимах работы является применение мероприятий, направленных на снижение влияния питающей сети (источника питания). При оценке потерь напряжения в сети следует учитывать, что они зависят не только от величины ее полного сопротивления, но и от соотношения его активной и реактивной составляющих, а также режима работы двигателя.

2. Пуск асинхронного двигателя будет тем менее устойчивым, чем больше преобладание индуктивной составляющей в полном сопротивлении питающей сети, значение которого фиксировано. При равных долях активной и индуктивной составляющих в сопротивлении сети асинхронный двигатель будет иметь минимальную перегрузочную способность по критическому моменту.

3. Изложена методика анализа статических и динамических характеристик электропривода на основе широкодиапазонного асинхронного двигателя, отличающаяся учетом всех параметров питающей сети и всех свободных составляющих величин переходного процесса. Методика позволяет получить качественную картину и дать количественную оценку изменения свободных составляющих в зависимости от сопротивления питающей сети и соотношения его активной и реактивной составляющих.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов. – 4-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

3. Дмитренко Ю.И., Ковалев Е.Б., Непочатов В.В. Программа RP4A для обработки результатов испытаний асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором // Взрывозащищенное электрооборудование: