

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕХОДА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ТРЕХФАЗНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ В ОДНОФАЗНЫЙ

Математическая модель перехода асинхронного двигателя с трехфазного режима работы в однофазный при питании его от тиристорного регулятора напряжения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронный двигатель, однофазный режим, переходной процесс, регулятор напряжения, трехфазный режим.

Математична модель переходу асинхронного двигуна із трифазного режиму роботи в однофазний при живленні його від тиристорного регулятора напруги.

К л ю ч о в і с л о в а: асинхронний двигун, однофазний режим, перехідний процес, регулятор напруги, трифазний режим.

Постановка проблемы. В настоящее время все большим спросом на угольных шахтах пользуются разработанные УкрНИИВЭ взрывозащищенные устройства плавного пуска с регулятором напряжения. Опыт эксплуатации устройств плавного пуска в электроприводе шахтных магистральных ленточных конвейеров подтвердил эффективность их применения в транспортной системе в целом, так как дорогостоящих порывов грузовой ленты и остановки по этой причине конвейера практически не наблюдалось. Основная задача, решаемая при пуске электропривода с асинхронным двигателем (АД), – получение плавного нарастания силы тока, момента и частоты вращения АД. При использовании регулятора напряжения она обеспечивается плавным нарастанием напряжения на АД по выбранному закону.

При таком способе управления осуществляется дискретное воздействие на АД и в течение периода питающего напряжения (0,02 с при частоте $f_c = 50$ Гц) происходит чередование схем подключения статорных цепей к трехфазной питающей сети в следующей последовательности: трехфазное подключение, двухфазное подключение, отключение всех фаз [1].

Поэтому для моделирования работы АД от тиристорного регулятора напряжения необходимо анализировать работу АД не только в установленном режиме и всех отмеченных выше симметричных и несимметричных режимах, но также и в переходных режимах между ними.

Анализ исследований и публикаций. Всем несимметричным режимам АД соответствует не круговое, а эллиптическое магнитное поле в его воздушном зазоре. Вопрос расчета АД с эллиптическим магнитным полем не

нов. Еще Р.Рихтер [2] предложил эллиптическое магнитное поле в воздушном зазоре АД, создаваемое обмоткой статора, питаемого от несимметричного напряжения, разлагать на два вращающихся в противоположные стороны поля прямой Φ_{s1} и обратной последовательности Φ_{s2}

$$\Phi_s = \Phi_{s1} + \Phi_{s2}.$$

Поскольку поле создается током, то и ток в обмотках статора можно представить состоящими из токов прямой и обратной последовательности

$$I_s = I_{s1} + I_{s2}.$$

Каждое из этих полей статора взаимодействует с ротором точно так же, как в симметричной электрической машине (ЭМ), поскольку совершенно безразлично, каким образом поле создается. Эти поля наводят в обмотках электродвижущую силу (ЭДС) с различным чередованием фаз и различную по значению и частоте, зависящую от скорости движения поля относительно обмотки.

Уравнения напряжений для многофазной короткозамкнутой ЭМ имеют вид [2]:

$$U_1 = - (R_1 + j \cdot X_1) \cdot I_s - j \cdot X_{12} \cdot (I_s + I_r) = - (R_1 + j \cdot X_1) \cdot I_s + E_s;$$

$$0 = - (R_2 + j \cdot s \cdot X_2) \cdot I_r - j \cdot s \cdot X_{12} \cdot (I_s + I_r) = - (R_2 + j \cdot s \cdot X_2) \cdot I_r + s \cdot E_s,$$

где R_1, X_1 – активное и реактивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

R_2, X_2 – приведенные к статору активное и реактивное сопротивление рассеяния обмотки ротора;

X_{12} – главное приведенное реактивное сопротивление взаимоиנדукции статора и ротора;

I_s – приведенная к статору сила тока ротора;

s – скольжение.

Поскольку ротор будет вращаться относительно прямого поля в прямом направлении с частотой $f_{21} = f_1 \cdot s$, то приведенную к статору ЭДС ротора с частотой f_{21} можно определить из выражений:

$$E_r = E_s \cdot s;$$

$$s = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1, \quad (1)$$

где E_s – ЭДС, наведенная прямым полем статора в статоре.

При моделировании однофазной ЭМ можно представить себе, что оба вращающихся в противоположные стороны поля создаются двумя отдельными, механически и электрически связанными между собой ЭМ трехфазного тока. В этом случае фаза однофазной обмотки статора соответствует двум последовательно соединенным фазам многофазной обмотки и вместо действия одного (приведенного к статорной обмотке) роторного тока мы должны учитывать действие, соответствующее обоим вращающимся полям роторных токов I_{r1} и I_{r2} . Тогда суммарное реактивное сопротивление статорной обмотки, состоящее из двух последовательно включенных фаз

трехфазной обмотки и соответствующее пульсирующему полю, равно двойной индуктивности трехфазной обмотки [3].

Поскольку ротор будет вращаться относительно обратного поля в обратном направлении с частотой $f_{22}=(2-s)$, то приведенную к статору ЭДС ротора с частотой f_{22} можно определить из выражения:

$$E_{r2}=E_{s2} \cdot (2-s), \quad (2)$$

где E_{s2} – ЭДС, наведенная обратным полем статора в статоре.

Отсюда уравнение для однофазной ЭМ будет иметь вид:

$$U_1 = -(2 \cdot R_1 + j \cdot 2 \cdot X_1) \cdot I_s - j \cdot X_{12} \cdot (I_s + I_{r1}) - j \cdot X_{12} \cdot (I_s + I_{r2}) = -(2 \cdot R_1 + j \cdot 2 \cdot X_1) \cdot I_s + E_{s1} + E_{s2};$$

$$0 = -(R_2 + j \cdot s \cdot X_2) \cdot I_{r1} - j \cdot s \cdot X_{12} \cdot (I_s + I_{r1}) = -(R_2 + j \cdot s \cdot X_2) \cdot I_{r1} + s \cdot E_{s1};$$

$$0 = -(R_2 + j \cdot (2-s) \cdot X_2) \cdot I_{r2} - j \cdot (2-s) \cdot X_{12} \cdot (I_s + I_{r2}) = -(R_2 + j \cdot (2-s) \cdot X_2) \cdot I_{r2} + (2-s) \cdot E_{s2}.$$

Схема замещения для АД с эллиптическим магнитным полем предложенная в [4], приведена на рисунке 1.

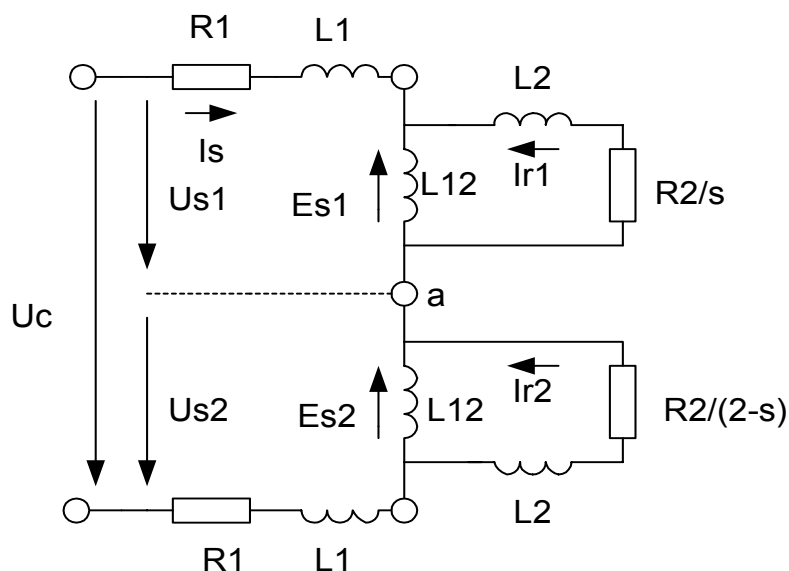


Рисунок 1 – Схема замещения однофазного асинхронного двигателя

В дальнейшем теория однофазного двигателя была усовершенствована М.П.Костенко [5], С.Сили [6], А.И.Адаменко [7], А.И.Вольдеком [8] и И.А. Сыромятниковым [9], а также в монографиях [4,10]. Все эти работы относятся к усовершенствованию схемы замещения однофазного АД, которое позволяет рассчитывать характеристики однофазного двигателя в стационарных режимах работы, и не рассматривают переходные процессы.

Анализируя состояние вопроса расчета и моделирования переходных и стационарных режимов, можно отметить, что уравнения, описывающие стационарный режим, а именно схему замещения АД, несколько отличаются от дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы. Хотя в реальной ЭМ [10] обмотки взаимно перемещаются и частота тока в обмотках ротора и статора различна, но при записи уравнений бу-

дем считать, что обмотки ротора и статора неподвижны и частота напряжения и тока в них одинакова. Преобразование энергии в ЭМ осуществляется в воздушном зазоре, причем неважно, вращаются обмотки или они неподвижны. Необходимое для преобразования энергии условие – взаимная неподвижность полей статора и ротора – сохраняется и при неподвижных, и при вращающихся обмотках.

Чтобы сохранить инвариантной мощность и иметь дело с реальными напряжением и током, есть два пути:

- а) изменить сопротивление в псевдонеподвижных обмотках;
- б) ввести в эти обмотки ЭДС, уменьшающую силу тока в заторможенной ЭМ.

Первый способ широко применяется при анализе асинхронных ЭМ с помощью схем замещения, а второй – при составлении дифференциальных уравнений.

Цель статьи. Моделирование процесса перехода АД из трехфазного режима работы в однофазный при его работе от тиристорного регулятора напряжения.

Результаты исследований. При моделировании трехфазной асинхронной ЭМ обычно используются уравнения, составленные для обобщенной ЭМ [4, 10], т.е. для двухполюсной симметричной идеализированной ЭМ, имеющей по паре обмоток на роторе и статоре.

Поскольку цель работы – исследование переходного процесса в АД при его работе от регулятора напряжения, в частности при переходе его с трехфазного режима работы на однофазный, и поскольку АД будет работать в однофазном режиме менее половины периода частоты тока, можно не учитывать изменение его скорости за это время и исключить из рассмотрения уравнение движения.

Для описания переходного процесса на малом промежутке времени мы должны иметь мгновенные значения силы тока, а уравнения представить в виде проекции уравнений (2) на неподвижные оси координат α - β . Результирующие дифференциальные уравнения, приведенные в [2], имеют вид:

$$\begin{aligned} d\Psi_{s1\alpha}/dt &= U_{s1\alpha} - R_1 \cdot i_{s\alpha}; \\ d\Psi_{s1\beta}/dt &= U_{s1\beta} - R_1 \cdot i_{s\beta}; \\ d\Psi_{r1\alpha}/dt &= -R_1 \cdot i_{r1\alpha} - \omega_2 \cdot \Psi_{r1\beta}; \\ d\Psi_{r1\beta}/dt &= -R_1 \cdot i_{r1\beta} + \omega_2 \cdot \Psi_{r1\alpha}; \\ d\Psi_{s2\alpha}/dt &= U_{s2\alpha} - R_2 \cdot i_{s\alpha}; \\ d\Psi_{s2\beta}/dt &= U_{s2\beta} - R_2 \cdot i_{s\beta}; \\ d\Psi_{r2\alpha}/dt &= -R_2 \cdot i_{r2\alpha} + \omega_2 \cdot \Psi_{r2\beta}; \\ d\Psi_{r2\beta}/dt &= -R_2 \cdot i_{r2\beta} - \omega_2 \cdot \Psi_{r2\alpha}, \end{aligned}$$

где $\omega_2 \cdot \Psi_{r1\beta}$, $\omega_2 \cdot \Psi_{r1\alpha}$ – ЭДС ротора от прямого поля;
 $\omega_2 \cdot \Psi_{r2\beta}$, $\omega_2 \cdot \Psi_{r2\alpha}$ – ЭДС ротора от обратного поля.

Отсюда

$$\begin{aligned}\Psi_{s1} &= L_1 \cdot I_s + L_{12} \cdot (I_s + I_{r1}); \\ \Psi_{s2} &= L_1 \cdot I_s + L_{12} \cdot (I_s + I_{r2}); \\ \Psi_{r1} &= L_2 \cdot I_{r1} + L_{12} \cdot (I_s + I_{r1}); \\ \Psi_{r2} &= L_2 \cdot I_{r2} + L_{12} \cdot (I_s + I_{r2}).\end{aligned}$$

Эти уравнения позволяют определить силу тока однофазного АД по известным значениям напряжения прямой и обратной последовательностей U_{s1} и U_{s2} , которые можно определить из схемы замещения (рисунок 1). Но это напряжение зависит от скольжения АД и при исследовании переходного процесса нам неизвестно. Поэтому целесообразно преобразовать эти уравнения, просуммировав первое-четвертое и второе-пятое. Учитывая, что $u_{1\alpha} = u_{11\alpha} + u_{12\alpha}$ и $u_{1\beta} = u_{11\beta} + u_{2\beta}$ (равны составляющим напряжения сети), получим модернизированную схему замещения (рисунок 2) и дифференциальные уравнения для расчета переходных процессов в однофазном АД в системе координат α, β в окончательном виде:

$$\begin{aligned}d\Psi_{s\alpha} / dt &= U_{s\alpha} - 2 \cdot R_1 \cdot i_{s\alpha}; \\ d\Psi_{s\beta} / dt &= U_{s\beta} - 2 \cdot R_1 \cdot i_{s\beta}; \\ d\Psi_{r1\alpha} / dt &= -R_2 \cdot i_{r1\alpha} - \omega_2 \cdot \Psi_{r1\beta}; \\ d\Psi_{r1\beta} / dt &= -R_2 \cdot i_{r1\beta} + \omega_2 \cdot \Psi_{r1\alpha}; \\ d\Psi_{r2\alpha} / dt &= -R_2 \cdot i_{r2\alpha} + \omega_2 \cdot \Psi_{r2\beta}; \\ d\Psi_{r2\beta} / dt &= -R_2 \cdot i_{r2\beta} - \omega_2 \cdot \Psi_{r2\alpha}.\end{aligned} \tag{3}$$

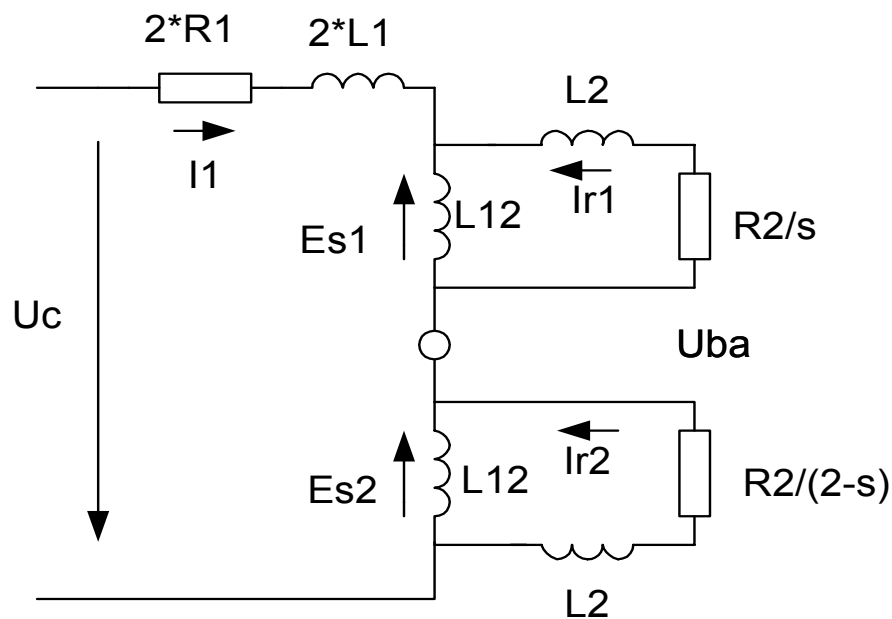


Рисунок 2 – Модернизированная схема замещения однофазного асинхронного двигателя

Для моделирования по уравнениям (3) необходимо выразить силу тока АД через потокосцепление, которое можно определить из матричного уравнения

$$\Psi = L \cdot I,$$

где Ψ – матрица-столбец потокосцеплений 6×1 ;

L – матрица индуктивности размером 6×6 ;

I – матрица-столбец силы тока размером 6×1 ,

$$\begin{pmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \\ \Psi_{r1\alpha} \\ \Psi_{r1\beta} \\ \Psi_{r2\alpha} \\ \Psi_{r2\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \cdot L_{11} & 0 & L_{12} & 0 & L_{12} & 0 \\ 0 & 2 \cdot L_{11} & 0 & L_{12} & 0 & L_{12} \\ L_{12} & 0 & L_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{12} & 0 & L_{22} & 0 & 0 \\ L_{12} & 0 & 0 & 0 & L_{22} & 0 \\ 0 & L_{12} & 0 & 0 & 0 & L_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{r1\alpha} \\ I_{r1\beta} \\ I_{r2\alpha} \\ I_{r2\beta} \end{pmatrix}.$$

Из этого уравнения можно определить силу тока

$$I = L^{-1} \cdot \Psi = G_{1f} \cdot \Psi, \quad (4)$$

где $G_{1f} = L^{-1}$ – матрица, обратная матрице индуктивности

$$G_{1f} = \begin{pmatrix} G_{s1} & 0 & G_{s2} & 0 & G_{s3} & 0 \\ 0 & G_{s1} & 0 & G_{s2} & 0 & G_{s3} \\ G_{r11} & 0 & G_{r12} & 0 & G_{r13} & 0 \\ 0 & G_{r11} & 0 & G_{r12} & 0 & G_{r13} \\ G_{r21} & 0 & G_{r22} & 0 & G_{r23} & 0 \\ 0 & G_{r21} & 0 & G_{r22} & 0 & G_{r23} \end{pmatrix}.$$

Подставляя это значение G_{1f} в (4), получим уравнения для силы тока

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= G_{s1} \cdot \Psi_{s\alpha} + G_{s2} \cdot \Psi_{r1\alpha} + G_{s3} \cdot \Psi_{r2\alpha}; \\ i_{s\beta} &= G_{s1} \cdot \Psi_{s\beta} + G_{s2} \cdot \Psi_{r1\beta} + G_{s3} \cdot \Psi_{r2\beta}; \\ i_{r1\alpha} &= G_{r11} \cdot \Psi_{s\alpha} + G_{r12} \cdot \Psi_{r1\alpha} + G_{r13} \cdot \Psi_{r2\alpha}; \\ i_{r1\beta} &= G_{r11} \cdot \Psi_{s\beta} + G_{r12} \cdot \Psi_{r1\beta} + G_{r13} \cdot \Psi_{r2\beta}; \\ i_{r2\alpha} &= G_{r21} \cdot \Psi_{s\alpha} + G_{r22} \cdot \Psi_{r1\alpha} + G_{r23} \cdot \Psi_{r2\alpha}; \\ i_{r2\beta} &= G_{r21} \cdot \Psi_{s\beta} + G_{r22} \cdot \Psi_{r1\beta} + G_{r23} \cdot \Psi_{r2\beta}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя эти значения в (3), получим дифференциальные уравнения для расчета переходных процессов в однофазном АД

$$\begin{aligned}
d\Psi_{s\alpha} / dt &= U_{s\alpha} - 2 \cdot R_1 \cdot (G_{s1} \cdot \Psi_{s\alpha} + G_{s2} \cdot \Psi_{r1\alpha} + G_{s3} \cdot \Psi_{r\alpha 2}); \\
d\Psi_{s\beta} / dt &= U_{s\beta} - 2 \cdot R_1 \cdot (G_{s1} \cdot \Psi_{s\beta} + G_{s2} \cdot \Psi_{r1\beta} + G_{s3} \cdot \Psi_{r\beta 2}); \\
d\Psi_{r1\alpha} / dt &= -R_1 \cdot (G_{r11} \cdot \Psi_{s\alpha} + G_{r12} \cdot \Psi_{r1\alpha} + G_{r13} \cdot \Psi_{r2\alpha}) - \omega_2 \cdot \Psi_{r1\beta}; \\
d\Psi_{r1\beta} / dt &= -R_1 \cdot (G_{r11} \cdot \Psi_{s\beta} + G_{r12} \cdot \Psi_{r1\beta} + G_{r13} \cdot \Psi_{r2\beta}) + \omega_2 \cdot \Psi_{r1\alpha}; \\
d\Psi_{r2\alpha} / dt &= -R_1 \cdot (G_{r21} \cdot \Psi_{s\alpha} + G_{r22} \cdot \Psi_{r1\alpha} + G_{r23} \cdot \Psi_{r2\alpha}) + \omega_2 \cdot \Psi_{r2\beta}; \\
d\Psi_{r2\beta} / dt &= -R_1 \cdot (G_{r21} \cdot \Psi_{s\beta} + G_{r22} \cdot \Psi_{r1\beta} + G_{r23} \cdot \Psi_{r2\beta}) - \omega_2 \cdot \Psi_{r2\alpha}.
\end{aligned}$$

В качестве примера рассмотрим работу АД типа 2ЭДКОФ250М4, предназначенного для шахтного скребкового конвейера, от тиристорного регулятора напряжения. Исходные данные двигателя:

номинальное напряжение $U_{1n}=660$ В,

номинальная мощность $P_2=55$ кВт,

номинальная сила тока $I_{1n}=58$ А,

номинальный вращающий момент $M_H=350$ Н·м.

Сопротивления, входящие в схему замещения, равны: $R_1=0,118$; $R_2=0,216$; $X_1=0,42607$; $L_1=1,356 \cdot 10^{-3}$; $X_2=0,50455$; $L_2=1,606 \cdot 10^{-3}$; $X_{12}=15,146$; $L_{12}=0,04821$.

Поскольку АД работает от регулятора напряжения только во время пуска, то режим работы АД от перехода его из трехфазного режима накладывается на переходный режим пуска. Рассмотрим переход АД из трехфазного режима в однофазный во время установившегося режима работы с номинальной мощностью. Для задания начальных условий перехода и оценки полученных результатов сделаем расчет АД в различных режимах работы.

1. Двухфазный режим в системе координат α - β [8], описывающей симметричный трехфазный режим работы. Результаты расчета силы тока в двухфазном режиме приведены на рисунке 3: сила установившегося тока обмотки статора $I_{12f}=57,6$ А; $\cos(\varphi_{2f})=0,855$ ($31,2^\circ$); скольжение $s_H=0,03$.

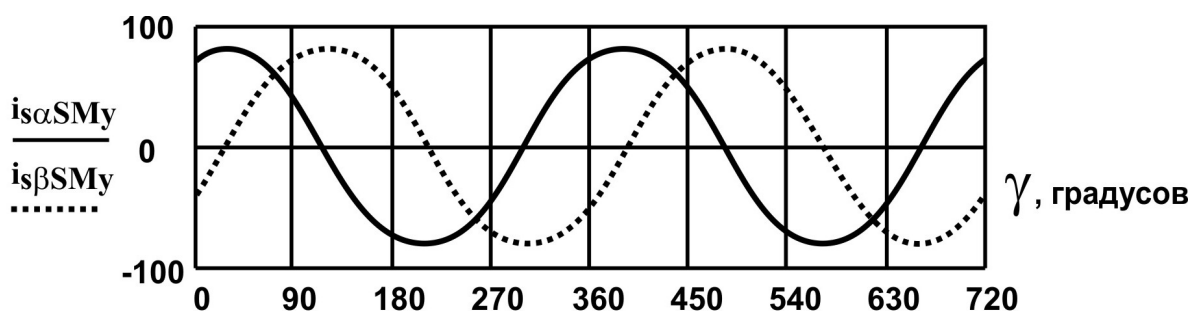


Рисунок 3 – Изменение во времени силы установившегося тока двигателя в симметричном двухфазном режиме, полученное моделированием в системе координат α - β при номинальной нагрузке, моменте сопротивления $M_c=350$ Н·м и номинальном напряжении

2. Символический метод в однофазном режиме по схеме замещения рисунка 2 при скорости вращения ротора, равной его скорости в номинальном трехфазном режиме. Результаты расчета: $I_{11f} = 90,3 \text{ А}$; $\cos(\varphi_{1f}) = 0,804$. Эти значения относительно параметров в двухфазном (трехфазном) режиме $I_{11f}/I_{121f} = 1,57$; $\cos(\varphi_{1f})/\cos(\varphi_{2f}) = 0,94$. Этот режим используем в дальнейшем как эталон для оценки результатов других расчетов.

3. В двухфазном режиме работы по уравнениям (5) для однофазного режима необходимо изменить знаки ЭДС в уравнениях (1) и (2). Результаты расчета: $i_{1sm1f} = 57,76 \text{ А}$. Из этого установившегося режима при силе тока фазы А $i_{s\alpha SM\gamma} = 0$ получены начальные условия моделирования перехода АД из трехфазного в однофазный режим. Результаты моделирования силы установившегося тока в фазе А $i_{A\gamma}$, в которой находится диод, прерывающий ток при $t_{A\gamma} > 0$, (сила тока фазы α обмотки $i_{s\alpha SM\gamma}$ при ее симметричном питании и сила тока фазы β , соответствующего току статора машины в однофазном режиме работы) приведены на рисунке 4. Совпадение результатов расчета с результатами, полученными в п.1, подтверждает безошибочность уравнения (5).

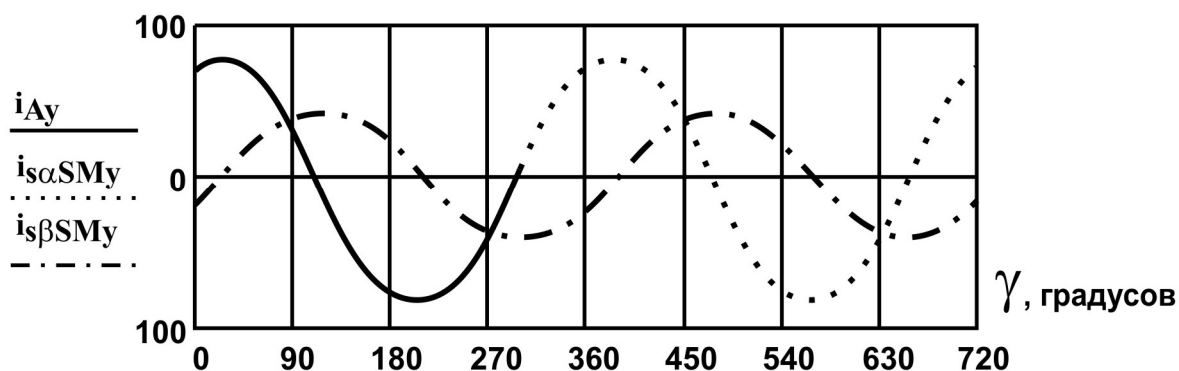


Рисунок 4 – Изменение во времени силы установившегося тока обмотки статора в двухфазном режиме по уравнениям (5), полученные его моделированием в системе координат α - β при номинальном напряжении и скольжении $s_H = 0,03$

Исходные данные для определения перехода АД из симметричного в несимметричный режим включают:

- угол, определяющий начальную фазу тока $i_{A\gamma}$, составляющий 301 градус (рисунок 4);
- все четыре потокосцепления АД на момент перехода силы тока $i_{A\gamma}$ через ноль.

4. В однофазном режиме в системе координат α - β по исходным данным п.3 результаты расчета ($I_{sn\beta} = 90,36 \text{ А}$) очень хорошо совпадают с ре-

зультатами, полученными в п.2. Сила тока в начальный момент перехода из трехфазного режима в однофазный приведена на рисунке 5.

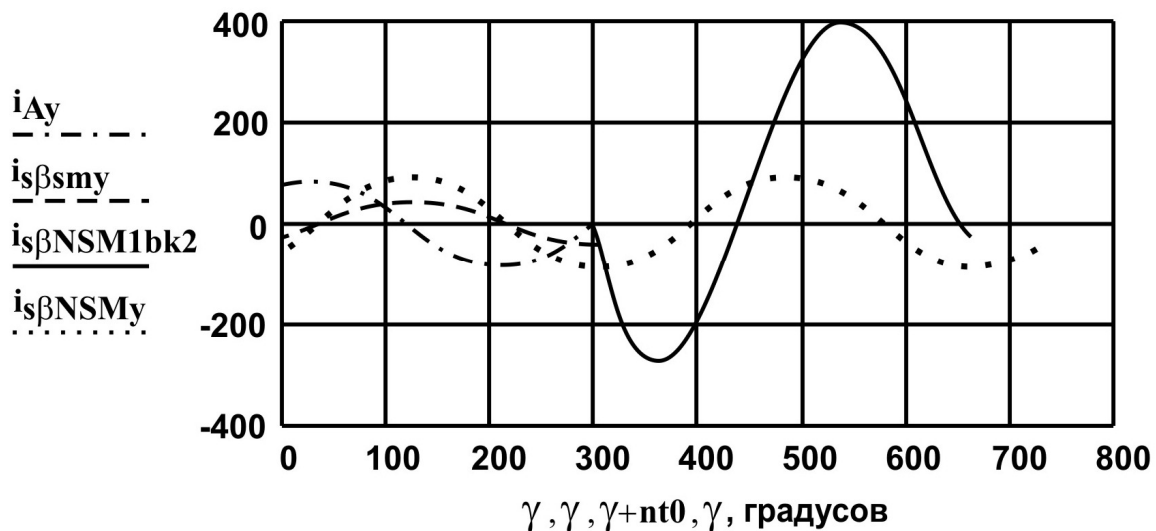


Рисунок 5 – Изменение во времени силы тока обмотки статора i_{Ay} при отключении фазы А диодом регулятора напряжения в момент перехода i_{Ay} через ноль в трехфазном установившемся режиме работы, полученное при моделировании в системе координат α - β при номинальном напряжении и скольжении $s=0,03$

Как следует из рисунка 5, в результате отставания силы тока i_A на $\varphi_A=31^\circ$ она проходит через ноль при $\omega \cdot t = 301$. Поскольку в цепи фазы А установлен диод, сила тока i_A при $\omega \cdot t > 301$ равна нулю. С этого момента появляется свободная составляющая силы тока, которая суммируется с силой установившегося тока фазы β $i_{\beta smy}$, и сила тока фазы β $i_{\beta NSM1bk2}$ начинает возрастать с 81,5 А, достигая своего максимума $i_{\beta NSMy}$ при $\varphi_{\beta m}=370^\circ$, т.е. через 69° . При угле управления регулятора напряжения, равном 69° , максимальное значение достигает 275 А, что почти в 3,5 раза превосходит силу номинального тока АД в трехфазном режиме работы.

Выводы:

1. Работа АД от тиристорного преобразователя связана с его переходом из трехфазного в однофазный режим и обратно.
2. Эти переходы вызывают появление свободных составляющих силы тока в обмотках АД, значительно увеличивающих силу суммарного тока.
3. В результате анализа переходного процесса переключения АД из трехфазного режима в однофазный, свойственного тиристорным регуляторам напряжения, на основе разработанной программы установлено, что при угле управления тиристором более 60° сила тока АД в однофазном режиме почти в 3,5 раза превосходит силу номинального тока в трехфаз-

ном. Этому току соответствуют значительные мгновенные потери в обмотках.

Список литературы

1. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И.Я.Браславский, З.Ш.Ишматов, В.Н.Поляков.-М.: АСАДЕМА, 2004.-202с.
2. Рихтер Р. Электрические машины /Р.Рихтер.-Т.4. Индукционные машины.- М.: Редакция энергетической литературы, 1939.- 472 с.
3. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П.Ковач, И.Рац; пер. с нем.- М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 735 с.
4. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины / А.В.Иванов-Смоленский. - М.: Энергия, 1980. – 927 с.
5. Костенко М.П. Электрические машины / М.П.Костенко.-М.: Госэнергоиздат, 1949.- 712 с.
6. Сили С. Электромеханическое преобразование энергии / С.Сили; пер. с англ.- М.: Энергия, 1968.- 376 с.
7. Адаменко А.И. Методы исследования несимметричных асинхронных машин /А.И.Адаменко.- К.: Наукова думка, 1969.
8. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И.Вольдек.-Л.: Энергия, 1974.- 840 с.
9. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А.Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984.- 240 с.
10. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии /И.П.Копылов. – М.: Энергия, 1973. - 400 с.