

УДК 621.311

**ВОПРОСЫ ПУСКА СИНХРОННЫХ МАШИН
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ****ГАСАНОВА Л.Г.***Азербайджанский Научно-Исследовательский и Проектно-Изыскательский
Институт Энергетики*

Синхронные машины с постоянными магнитами в последние годы находят широкое применение в качестве электромеханических преобразователей современных ветроэлектрических установок, кроме того они применяются в качестве двигателя в различных электроприводах и в качестве генераторов малых ГЭС. В статье разработана математическая модель, позволяющая исследовать пусковые характеристики синхронной машины с постоянными магнитами при холостом ходе, в генераторном и двигательном режимах, как при прямом пуске, так и при частотном. Даны рекомендации по формированию диаграмм частотного пуска в вышеуказанных режимах при различных значениях момента на валу, а также величины энергии постоянных магнитов.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, синхронная машина с постоянными магнитами, математическая модель, частотный пуск.

Синхронные машины с постоянными магнитами в последние годы все более расширяют сферу своего применения, как в качестве двигателей, так и в качестве генераторов, преимущественно в возобновляемых источниках энергии [1,2,3].

При их работе в качестве генераторов (в ветроагрегатах, в малых ГЭС) – они, как правило, работают совместно с преобразователями частоты, которые выполнены на современной полупроводниковой базе – силовых транзисторах или силовых полностью управляемых тиристорах.

При их работе двигателями в качестве электроприводов различных механизмов зачастую также требуется применение вышеуказанных полупроводниковых преобразователей частоты [4,5].

Наличие постоянных магнитов в этих электрических машинах создает особые условия при режимах пуска этих машин – как при прямом пуске, так и при частотном с помощью преобразователя частоты.

Целью настоящей статьи является исследование режимов пуска этих машин на разработанной математической модели и выдача рекомендации по рационализации этих режимов.

Математическая модель частотноуправляемой синхронной машины с постоянными магнитами разработанная нами приведена в [3]. Необходимо отметить, что нижеприведенные уравнения математической модели базируются на хорошо известных уравнениях Парка, они записаны в осях d, q вращающихся со скоростью ротора машины учитывают изменения амплитуды и частоты подводимого к машине напряжения. Помимо этого в этих уравнениях постоянные магниты, учитываются в виде особого коэффициента M_f , который определяет величину энергии постоянных магнитов, отнесенных к единице их объема. Необходимо отметить, что при малых значениях остаточной индукции этот коэффициент M_f характеризует величину коэрцитивной силы магнитов [3]. Например, при $M_f=1$ эта величина способна при холостом ходе синхронной машины обеспечить величину э.д.с. на зажимах статора равного $e_{xx}=1$ [3].

Помимо этого в этих уравнениях произведено специальное преобразования составляющих напряжения по продольной и поперечной осям U_{ds}, U_{qs} с целью создания возможности отдельного регулирования как амплитуды напряжения так и его частоты.

Таким образом, уравнения синхронной машины с постоянными магнитами предстают в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 p\Psi_{ds} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau)(\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin(k_{fs} \cdot \tau)(\cos \alpha + \sin \alpha) \right] - \omega_r \cdot \Psi_{qs} - r_s \cdot i_{ds} \\
 p\Psi_{qs} &= 0,707 \cdot k_{us} \left[\cos(k_{fs} \cdot \tau)(\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin(k_{fs} \cdot \tau)(\cos \alpha - \sin \alpha) \right] + \omega_r \cdot \Psi_{ds} - r_s \cdot i_{qs} \\
 p\Psi_{dr} &= -\frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot \Psi_{dr} + \frac{r_{dr} \cdot x_{ad}}{x_{dr}} \cdot i_{ds} + \frac{r_{dr}}{x_{dr}} \cdot M_f \\
 p\Psi_{qr} &= -\frac{r_{qr}}{x_{qr}} \cdot \Psi_{qr} + \frac{r_{qr} \cdot x_{aq}}{x_{qr}} \cdot i_{ds} \\
 p\alpha &= \omega_r \\
 p\omega_r &= \frac{1}{T_j} m_\epsilon - \frac{1}{T_j} m_{\epsilon m} \\
 m_{\epsilon m} &= \Psi_{ds} \cdot i_{qs} - \Psi_{qs} \cdot i_{ds} \\
 i_{ds} &= \frac{x_{dr}}{\Delta d} \cdot \Psi_{ds} - \frac{x_{dr} \cdot x_{ad}}{\Delta d} \cdot M_f - \frac{x_{ad}}{\Delta d} \cdot \Psi_{dr} \\
 i_{qs} &= \frac{x_{qr}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qs} - \frac{x_{aq}}{\Delta q} \cdot \Psi_{qr}
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В этих уравнениях: $\Delta d = x_{ds} \cdot x_{dr} - x_{ad}^2$; $\Delta q = x_{qs} \cdot x_{qr} - x_{aq}^2$; k_{us}, k_{fs} – соответственно амплитуда и частота статорного напряжения U_s ; r_s, r_{dr}, r_{qr} – активные сопротивления статорных и роторных контуров по продольной и поперечной осям; $x_{ds}, x_{qs}, x_{dr}, x_{qr}, x_{ad}, x_{aq}$ – соответственно полные индуктивные сопротивления статора, ротора по осям d, q , а также сопротивления взаимоиндукции по этим осям; m_ϵ – значение момента на валу синхронной машины. В генераторном режиме это вращающий момент (знак его отрицательный), в двигательном режиме этот момент является тормозным (знак его положительный); $\Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$ – потокосцепления статора и ротора соответственно по осям d и q ; i_{ds}, i_{qs} – токи статорной обмотки по осям d и q ; α, ω_r – угол поворота и угловая частота вращения ротора; $\tau = \omega_s \cdot t$ – время в радианах, равно $\tau = 314 \cdot t$, t – сек.

Помимо уравнений (1) необходимо к ним присоединить уравнения для определения активной мощности машина p_s и реактивной мощности q_s , а также тока i_s , которые определяются по соотношениям:

$$\left. \begin{aligned}
 p_s &= U_{ds} \cdot i_{ds} + U_{qs} \cdot i_{qs} \\
 q_s &= U_{qs} \cdot i_{ds} - U_{ds} \cdot i_{qs} \\
 i_s &= \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где U_{ds}, U_{qs} – составляющая статорного напряжения U_s по осям d и q , i_s – ток статора.

На рис.1 представлены флюктограммы прямого пуска синхронной машины, параметры которой приведены в приложении 1. Пуск производится при $k_{us}=k_{fs}=1$ до 1000 рад. при моменте на валу машины равном $m_\epsilon=0$ и $M_f=1,2$. В период с $\tau=1000$ рад. момент на валу увеличивается до значения $m_\epsilon=-0,8$ (рис.1,а) (т.е. имитируется генераторный режим). При этом активная мощность на зажимах статора машины

становится равной $p_s = -0,788$ (рис.1,з). А реактивная мощность равна $q_s = -0,198$ при $m_e = 0$, и при $m_e = -0,8$ она равна $q_s = 0,01$ (практически равна нулю). В период времени от $\tau = 1500$ рад. до $\tau = 2000$ рад. осуществляется сброс момента до $m_e = 0$, а затем с $\tau = 2000$ рад. имитируется двигательный режим, т.е. на вал набрасывается момент равный $m_e = 0,8$ (плюс указывает на то, что синхронная машина работает в двигательном режиме) (рис.1,а).

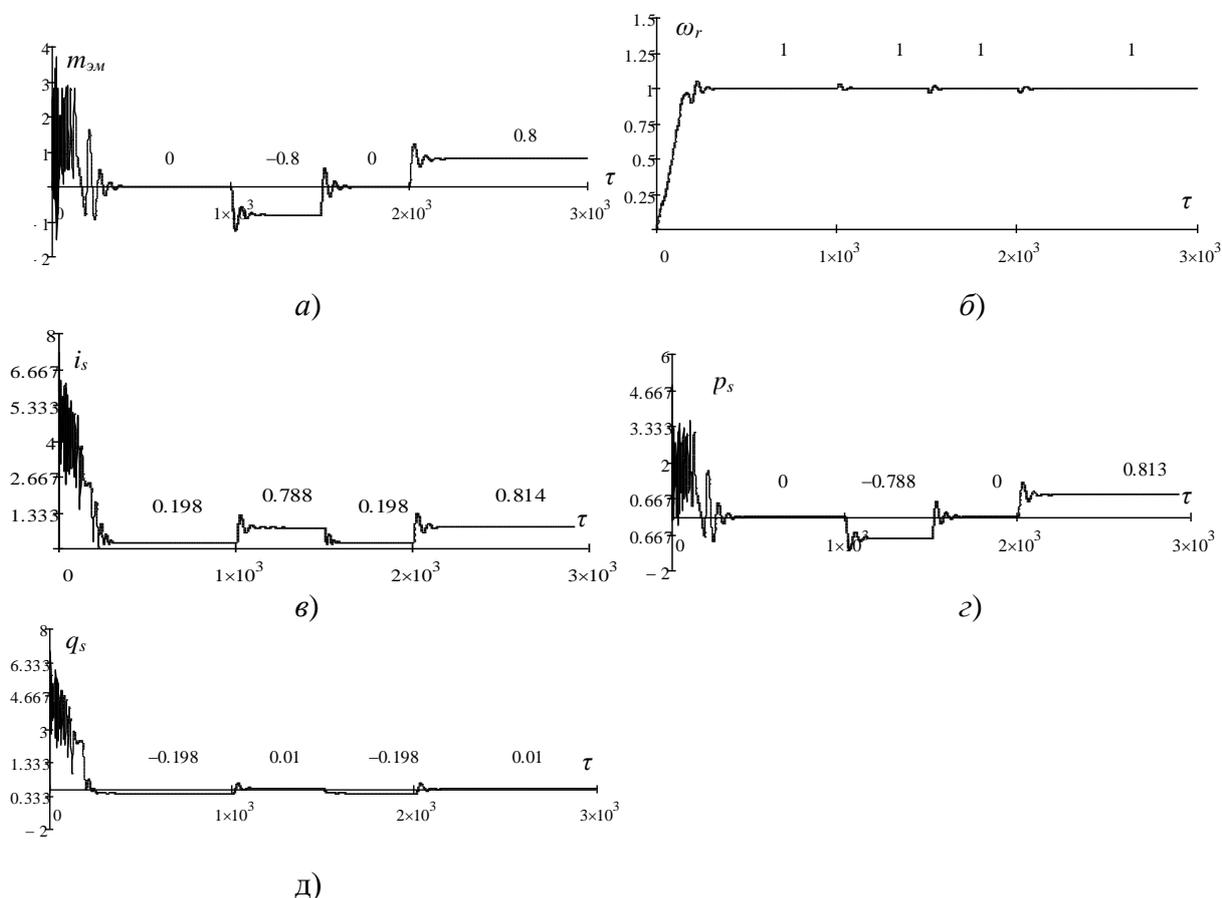


Рис.1. Флуктограммы изменения режимных параметров при прямом пуске синхронной машины.

Активная мощность на зажимах машины становится равной $p_s = 0,813$, а реактивная мощность $q_s \approx 0$ (рис.1, д). При этом частота вращения (рис.1, б) после запуска равна $\omega_r = 1$ и на протяжении приложения к валу генераторного и двигательного момента остается неизменной. Необходимо обратить внимание еще на один момент. При $m_e = 0$ активная мощность равна также нулю $p_s = 0$, но реактивная мощность и в генераторном и в двигательном режиме равна $q_s = -0,198$, т.е. машина в обоих режимах выдает в сеть вышеуказанную реактивную мощность, что определяется величиной энергии постоянного магнита, для этого случая равной $M_f = 1,2$. А при номинальной нагрузке как двигательном, так и в генераторных режимах $q_s \approx 0$, что указывает на то, что синхронная машина спроектирована на режим работы с $\cos\varphi_H = 1$. Помимо того, в генераторном режиме $p_s = -0,788$ меньше $m_e = 0,8$, а в двигательном режиме $p_s = 0,813$ больше $m_e = 0,8$, что также согласуется с принципом работы этой машины.

Таким образом, приведенные флуктограммы ярко демонстрируют адекватность и достоверность разработанной математической модели.

Из приведенных флюктограмм рис.1 видно, что при прямом пуске синхронной машины с постоянными магнитами, среднее значение электромагнитного момента в начальный период пуска равно $m_{эм} \approx 2$ (рис.1,а) и тока статора равно, $i_s \approx 5$ (рис.1,з), значительны также величины активной мощности $p_s \approx 2$ и реактивной мощности $q_s \approx 4,5$.

Частотный пуск позволяет значительно снизить эти величины. Если, для исследуемой машины с $M_f = 1,2$ осуществить частотный пуск при $m_0 = 0$ по закону:

$$k_{us} = k_{fs} = k_{fso} + \alpha \cdot \tau = 0,2 + 0,002 \cdot \tau \quad (3)$$

то флюктограммы имеют вид представленный на рис.2.

Из этих флюктограмм видно, что при частотном пуске значительно снижаются пусковые значения режимных параметров – среднее значение электромагнитного момента $m_{эм}$ не превышает значения $m_{эм} = 0,5$, (рис.2,в), величина среднего статорного тока $i_s = 2$ (рис.2,з), активная и реактивная мощности соответственно $p_s \leq 1$ и $q_s \leq 1,2$ (рис.2, д, е).

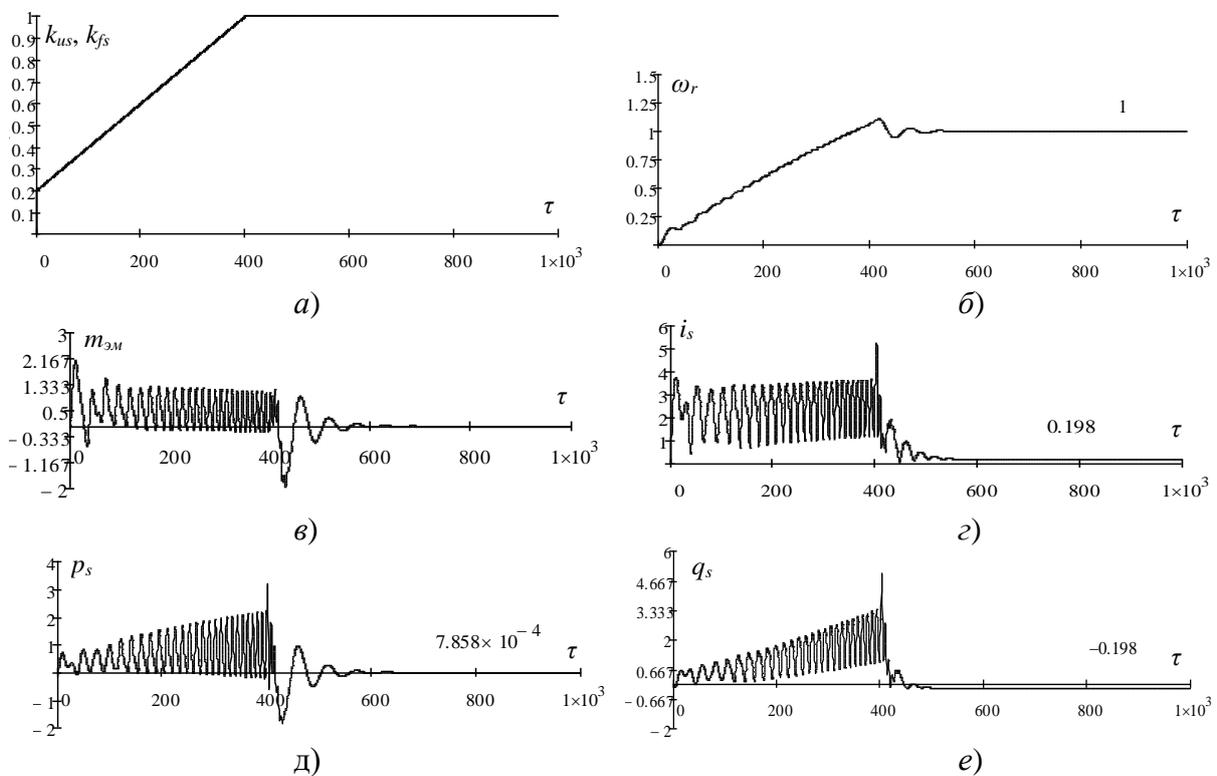


Рис.2. Флюктограмма изменений режимных параметров машины при частотном пуске с $m_0 = 0$ и $k_{us} = k_{fs} = 0,2 + 0,002 \cdot \tau$.

Исследования показали, что при $m_0 = 0$ при различных значениях M_f равных $M_f = 1,4; 1,6$ и $1,8$ пусковая диаграмма режимных параметров практически не изменяется.

Представляет интерес также исследование вопросов пуска этих машин при наличии на валу либо генераторного (движущего) момента, либо тормозного момента. Первый случай может быть, например, в ветроэлектрической установке, у которой, в качестве электромеханического преобразователя используется синхронный генератор с постоянными магнитами. Это – когда установка подключается к сети при наличии

незначительной величины ветра. То есть в этом случае движущий момент на валу действует на вал машины согласно с электромагнитным моментом.

Флюктограмма изменений режимных параметров машины представлена на рис.3. При этом частотный пуск осуществляется по выражению:

$$k_{us} = k_{fs} = 0,1 + 0,003 \cdot \tau \quad (4)$$

Диаграмма изменений режимных параметров генератора (рис.3) такая же как и в предыдущем случае, только наличие $m_{\epsilon} = -0,2$ на валу позволяет сократить по времени частотный разгон машины до $k_{us} = k_{fs} = 1$ почти на 20% и в два раза уменьшить начальное значение $k_{uso} = k_{fso} = 0,1$.

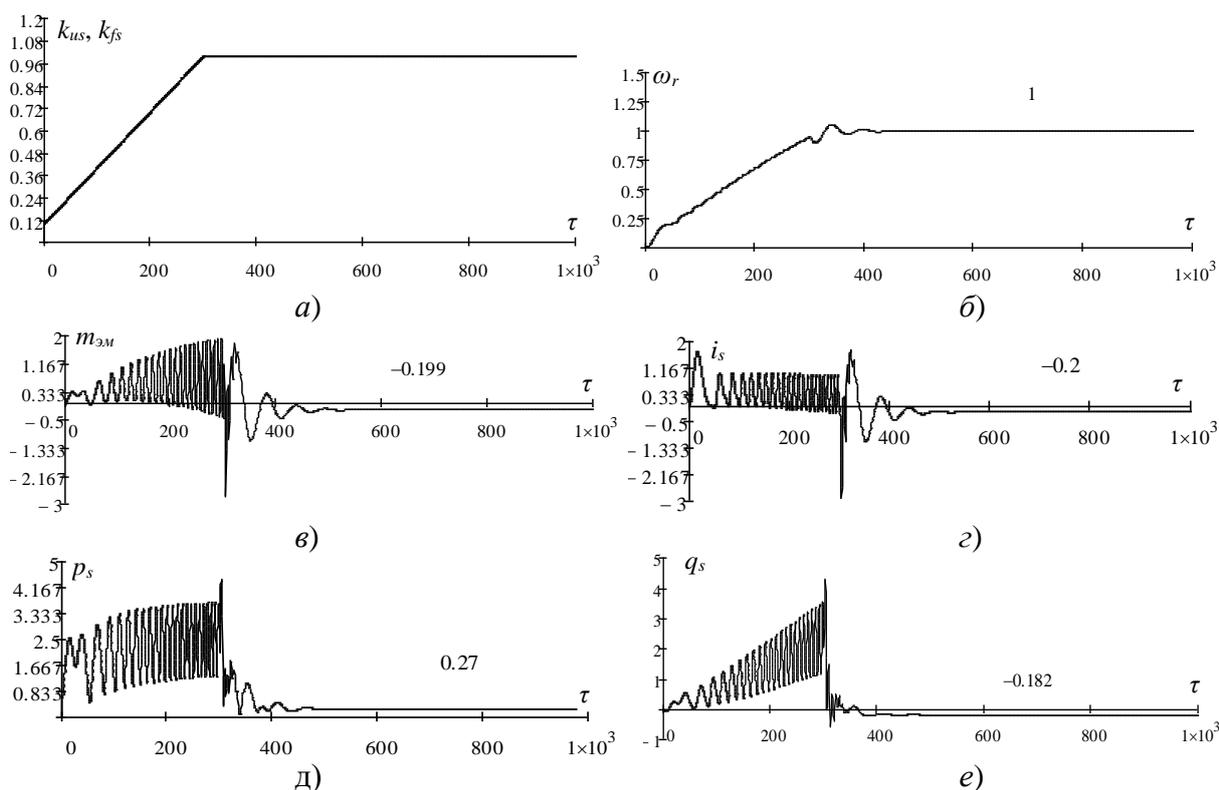


Рис.3. Флюктограмма изменений режимных параметров синхронной машины при частотном пуске $k_{us} = k_{fs} = 0,1 + 0,003 \cdot \tau$ и $m_{\epsilon} = 0,2$.

При наличии на валу синхронной машины тормозного момента, т.е. при использовании ее в режиме двигателя, естественно, время процесса частотного пуска увеличивается (флюктограммы рис.4). Так при $M_f = 1,2$ и $m_{\epsilon} = 0,4$ наиболее рационально формировать пусковую характеристику по выражениям (рис.4,а):

$$\left. \begin{aligned} k_{us} &= 0,25 + 0,000625 \cdot \tau \\ k_{fs} &= 0,2 + 0,000667 \cdot \tau \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

т.е. скорость нарастания амплитуды напряжения в начальный период пуска несколько выше скорости нарастания частоты.

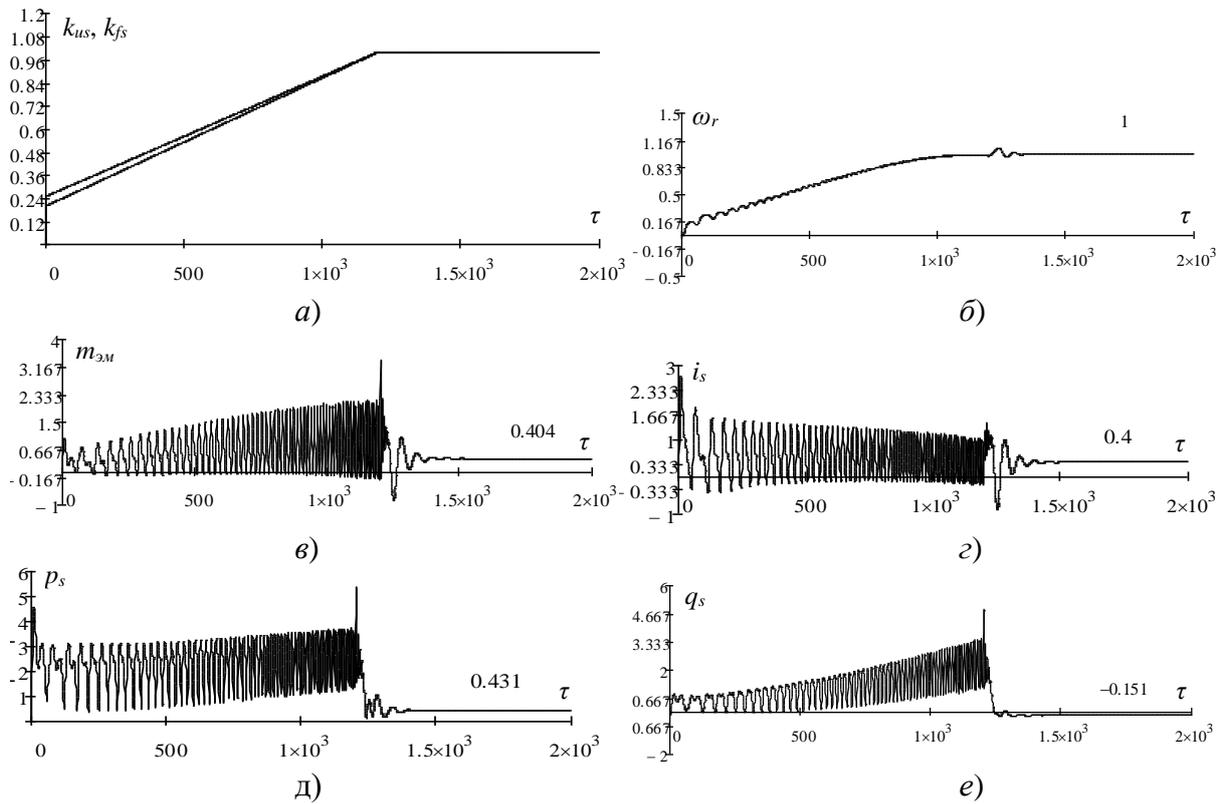


Рис.4. Флюктограмма изменений режимных параметров синхронной машины при частотном пуске в режиме двигателя при $m_6=0,4$.

В этом случае угловая частота вращения ω_r (рис.4,б) плавно (экспоненциально) изменяется от нуля до $\omega_r=1$. Все остальные режимные параметры – электромагнитный момент $m_{эм}$ (рис.4, в), статорный ток i_s (рис.4, д), активная p_s (рис.4, е) и реактивная q_s мощности (рис.4, е) плавно переходят из пускового режима в установившийся. В режиме двигателя установившиеся значения активной мощности на зажимах двигателя равно $p_s=0,404$, а реактивной $q_s=-0,151$. Таким образом, двигатель потребляет из сети активную мощность, выдает в сеть реактивную мощность. В этом режиме коэффициент мощности $\cos\varphi=0,9$ (опережающий), как было указано при $M_f=1,2$ номинальный коэффициент мощности равен $\cos\varphi_n=1$ (т.е. при моменте $m_{вн}=0,8$).

Многочисленным исследование режимов пуска синхронных машин с постоянными магнитами позволяют сделать следующие выводы. Значение энергии постоянных магнитов влияет на пусковую диаграмму синхронной машины (кстати, эти исследования особенно важны при проектировании этих машин). Поэтому именно разработанная нами математическая модель позволит правильно сформировать частотную пусковую характеристику машины.

Приложение

Параметры синхронного генератора (модельная машина)

$$\begin{aligned}
 x_{ds}=1,008 & \quad x_{dr}=1,039 & \quad x_{ad}=0,9135 & \quad r_s=0,02 \\
 x_{qs}=0,487 & \quad x_{qr}=0,511 & \quad x_{aq}=0,385 & \quad r_{dr}=0,08 & \quad r_{qr}=0,07
 \end{aligned}$$

$\frac{1}{T_j} = 0,005$, т.е. $T_j=200$ рад; $M_f=1,2$ ($\cos\varphi=1$), исследовались также значения $m_6=0$; $m_6=0,2$ и $m_6=0,4$ при $M_f=1,4$; 1,6 и 1,8.

ВЫВОДЫ:

1. Разработана математическая модель, позволяющая исследовать пусковые характеристики синхронной машины с постоянными магнитами при холостом ходе (без нагрузки на валу), в генераторном и двигательном режимах.
2. При частотном пуске указанной машины с $m_e=0$ достаточно сформировать ее с учетом значения только маховых масс ротора машины. При этом эта диаграмма (т.е. закон формирования $k_{us} = k_{fs} = k_{fso} + \alpha \cdot \tau$) будет одна и та же для различных значений M_f (1,2; 1,4; 1,6 и 1,8). В этом случае изменения режимных параметров в процессе пуска будут плавными (то есть плавным будет переход от режима пуска до установившегося режима).
3. При пуске исследуемой машины с малым значением генераторного момента на валу ($m_e = -0,2$) необходимо некоторая коррекция пусковой диаграммы в зависимости от величины M_f (тем больше значение M_f тем меньше время формирования пуска).
4. При пуске исследуемой машины в режиме двигателя с моментом на валу m_e необходимо некоторая коррекция пусковой диаграммы как от величины M_f , так и от величины момента на валу машины. Это необходимо осуществлять, чтобы обеспечить плавные переходы кривых изменения параметров машины из пусковых режимов в установившиеся.

-
1. *Гузев Б.В., Хакимьянов М.И.* Современные промышленные высоковольтные преобразователи частоты для регулирования асинхронных и синхронных двигателей. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». №3, 2011, с. 441-450.
 2. *Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г. Мусаев М.М.* Применение регулируемых электрических машин в гидроагрегатах малых ГЭС, работающих на энергосистему. Электротехника №5, 2018, с. 38-44.
 3. *Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г.* Моделирование и исследование синхронных генераторов ветроэлектрических установок при частотном управлении. Электричество, №7, 2010 г., с. 34-41.
 4. *Булгаков А.А.* Частотное управление асинхронными двигателями. Из-во «Наука», 1966 г.
 5. *Сыромятников И.А.* Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Из-ние 4-ое, М.Энергоатомиздат, 1984, с. 239.

SABİT MAQNİTLİ SİNXRON MAŞINLARIN İŞƏ SALMA MƏSƏLƏLƏRİ

HƏSƏNOVA L.H.

Son zamanlar müasir külək elektrik stansiyalarında sabit maqnitli sinxron maşınlar elektromexaniki çeviricilər kimi istifadəsi geniş yayılmışdır, bununla yanaşı, müxtəlif elektrik intiqalarında mühərrik kimi və kiçik hidroelektrik stansiyalarında generatorlar kimi istifadə olunur. Məqalədə sabit maqnitli sinxron maşınların mühərrik və generator rejimində yüksüz iş rejimində işəsalma xarakteristikasının, həmçinin tezlikə görə birbaşa işəsalması araşdırılmasına imkan verən riyazi model hazırlanmışdır. Yuxarıda geyd edilən rejimlərin müxtəlif moment dəyərləri ilə və sabit maqnit enerjisinin dəyəri tezlikə görə işəsalması üçün diaqramlarının formalaşmasına tövsiyələr verilmişdir.

Açar sözlər: külək elektrik qurğular, sabit maqnitli sinxron maşın, riyazi model, tezlikə görə birbaşa işəsalması.

QUESTIONS FOR STARTING SYNCHRONOUS MACHINES WITH PERMANENT MAGNETS

HASANOVA L.H.

In recent years, synchronous machines with permanent magnets have been widely used as electromechanical converters of modern wind power plants, in addition they are used as an engine in various electric drives and as generators of small hydroelectric power stations. The article developed a mathematical model that allows to investigate the starting characteristics of a synchronous machine with permanent magnets at idle, in the generator and motor modes, both during direct start and at frequency. Recommendations are given on the formation of frequency start diagrams in the above modes for various values of torque on the shaft, as well as the magnitudes of the energy of permanent magnets.

Ключевые слова: wind power installation, synchronous machines with permanent magnets, mathematical model, frequency start.