

4. **Zakharov I.V.** *Razvitiye teorii, razrabotka metodov i sredstv povysheniya effektivnosti induktorov s samokompensatsiyei reaktivnoi moshchnosti: Avtofef. diss. ... dokt. tekhn. nauk* (Development of the theory, development of methods and means for increasing the efficiency of inductors with self-compensation of reactive power: Aftoref. diss. ... Dr. Sci. (Eng.)). Almaty: Almatinskii institute energetiki i svyazi, 2007, 41 p.

5. **Kuvaldin A.B., Utegulov B.B., Zakharov I.V., Izhikova A.D.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2005, No. 2, pp. 53–56.

6. **Butyrin P.A., Gusev G.G., Kuzhman V.V., Mikheyev D.V., Shakirzyanov F.N.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of MPEI)*, 2015, No. 5, pp. 79–84.

7. **Patent RF No. 128033.** *Fil'trokompensiruyushcheye ustroystvo* (Patent of the Russian Federation No. 128033. Filter-compensating device/P.A. Butyrin, G.G. Gusev, Kuzhman V.V., Tolcheyev O.B.). *Bulletin of inventions*, 2013, No. 13, 5 p.

8. **Shcherbakov A.G.** *Identifikatsiya parametrov matematicheskikh modelei elektrotekhnicheskikh kompleksov kanonicheskimi metodami: Avtofef. diss. ... cand. tekhn. nauk* (Identification of parameters of mathematical models of electrotechnical complexes by canonical methods: Author's abstract. diss ... Cand. Sci. (Eng.)). Omsk: Omsk State Technical University. 2002, 39 p.

9. **Sytnik A.A., Klyuchka K.N., Protasov S.Yu.** *Izv. Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – in Russ. (News of the Tomsk Polytechnic University)*, 2013, vol. 322, No. 4, pp. 103–106.

10. **Bakhvalov N.S., Lapin A.V., Chizhonkov E.V.** *Chislennyye metody v zadachakh i uprazhneniyakh/Pod red. V.A. Sadovnichego* (Numerical methods in problems and exercises/ Edit. by V.A. Sadovnichii). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 2000, 190 p.

[22.06.2017]

Электричество, 2017, № 10, с. 60–68

DOI:10.24160/0013-5380-2017-10-60-68

Использование регулируемой асинхронной машины двойного питания в синхронном режиме

МУСТАФАЕВ Р.И., ГАСАНОВА Л.Г.

Машины двойного питания, выполненные на базе асинхронной машины с фазным ротором, благодаря стремительному прогрессу в преобразовательной технике, находят широкое применение при работе как в качестве генераторов (ветроэнергетика и малая гидроэнергетика), так и в качестве двигателей – там, где требуется относительно небольшой диапазон регулирования частоты вращения (30–40%) при ограничениях на установленную мощность преобразователя частоты. Нередки случаи, когда технология применения этих машин в качестве генераторов и двигателей диктует их дополнительную работу в режиме околосинхронной частоты вращения, т.е. без ее регулирования. В этом случае предлагается, используя только выпрямительную часть преобразователя частоты, питающего роторную обмотку асинхронной машины двойного питания (АМДП), перевести ее в синхронный режим работы. Это позволит значительно увеличить выдачу реактивной мощности в электрическую сеть и более эффективно использовать сам генератор. Приводится математическая модель АМДП, позволяющая в одной структуре исследовать все режимы работы АМДП: непосредственно по своему назначению (регулирование частоты вращения вверх и вниз от синхронной); в режиме синхронного генератора со значительной выдачей реактивной мощности в сеть, а также в режиме асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором. Анализ флюктограмм, полученных на математической модели, показал высокую эффективность разработанной модели, ее адекватность, а также работоспособность и осуществимость предложенной схемы перевода АМДП в синхронный и асинхронный режимы работы.

Ключевые слова: асинхронная машина двойного питания, синхронный генератор, асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором, синхронный режим работы, регулирование частоты вращения, математическая модель

Асинхронные машины двойного питания (АМДП) в последние годы находят широкое применение в качестве генераторов ветроэлектрических установок [1–3]. Рекомендуется применять их также в качестве генераторов в гидроагрегатах малых ГЭС [4, 5]. Диапазон применения АМДП в качестве двигателей также обширен – они востребованы там, где необходимо регулировать частоту вращения приводного механизма в относительно небольших пределах (30–40% номинальной) при

ограничении мощности преобразователя частоты, питающей роторную обмотку АМДП.

Однако в зависимости от требований либо технологии производства электроэнергии (при работе АМДП генератором), либо технологии работы приводного механизма (при работе АМДП двигателем) возможны случаи, когда длительное время не требуется регулировать частоту вращения, будь то турбина (приводной двигатель), либо рабочий механизм. Например, при оснащении гидроагрегатов

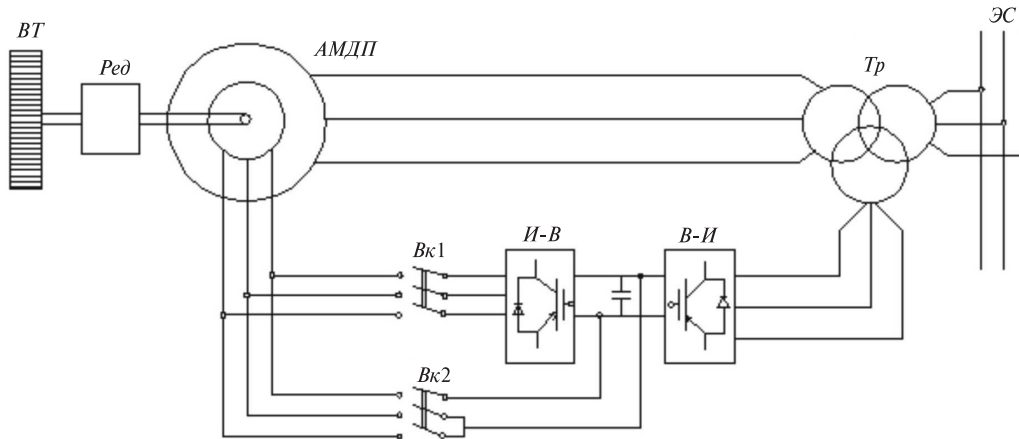


Рис. 1. Электрическая схема перевода АМДП с преобразователем частоты в цепи ротора в синхронный режим работы

малых ГЭС пропеллерными турбинами [6] регулировать частоту вращения генератора необходимо при существенном увеличении (или уменьшении) стока воды. Именно при этом изменении стока воды (расхода) регулирование частоты вращения вала гидроагрегата посредством АМДП позволяет повысить КПД гидротурбины, а следовательно, и выходную мощность гидроагрегата, отдаваемую в электрическую сеть. Когда расход воды постоянен (а этот период может продолжаться длительное время), то частота вращения должна оставаться постоянной.

При наличии у АМДП в цепи ротора преобразователя частоты это можно реализовать следующими способами: либо вывести преобразователь частоты из работы, а затем закортить обмотки ротора АМДП, превратив таким образом эту машину в асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором, либо оставить в работе преобразователь частоты, отрегулировав его так, чтобы частота вращения генератора находилась вблизи синхронной. В первом случае совершенно очевидно, что коэффициент мощности генератора будет низким, т.е. генератор будет потреблять из сети значительную реактивную мощность. Во втором случае коэффициент мощности будет находиться в пределах $\cos\varphi \approx 1$ (т.е. генератор не потребляет, но и не выдает реактивную мощность).

Для повышения выдачи реактивной мощности в сеть предлагается роторную обмотку АМДП подключить к источнику постоянного тока, т.е. перевести АМДП в режим работы синхронной машины. Это позволит обеспечить реактивной мощностью узел нагрузки энергосистемы, к которой подключена АМДП.

Принципиальная электрическая схема перевода АМДП с преобразователем частоты в цепи ротора в синхронный режим работы может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1, где *ВТ* – приводная турбина (например, водяная), посредством

редуктора (*Ред.*) сочлененная с валом генератора, выполненного на базе АМДП; *Тр* – трехобмоточный трансформатор, питающий статорную и роторную обмотки АМДП; *ЭС* – электрическая сеть (система); *И-В*, *В-И* – инвертор–выпрямитель, выполненные на базе полностью управляемых IGBT – транзисторах или GTO – тиристорах; *Вк1*, *Вк2* – коммутационные ключи (выключатели).

Схема соединения обмоток ротора асинхронной машины с фазным ротором на рис. 1 известна [7], ее оригинальность заключается в том, что обмотки ротора получают питание в синхронном режиме от звена постоянного тока преобразователя частоты, предназначенного для регулирования частоты вращения агрегата в режиме работы управляемой со стороны ротора АМДП.

На разработанной ранее авторами математической модели АМДП (система дополнена выражениями для активных и реактивных мощностей статора и ротора) [1] продемонстрируем работоспособность вышеуказанного предложения. Уравнения АМДП, частотно управляемой со стороны ротора, представляются в виде:

$$\begin{aligned}
 p\psi_{ds} &= -U_s \sin\theta + \psi_{qs}(1-s) - r_s i_{ds}; \\
 p\psi_{qs} &= U_s \cos\theta + \psi_{ds}(1-s) - r_s i_{qs}; \\
 p\psi_{dr} &= -k_{ur} \sin(k_{fr}\tau) - r_r i_{dr}; \\
 p\psi_{qr} &= k_{ur} \cos(k_{fr}\tau) - r_r i_{qr}; \\
 ps &= \frac{1}{T_j} m_{вд} - \frac{1}{T_j} m_{эм}; \\
 p\theta &= s; \\
 m_{эм} &= \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}; \\
 p_s &= U_{ds} i_{ds} + U_{qs} i_{qs}; \\
 q_s &= U_{qs} i_{ds} - U_{ds} i_{qs}; \\
 p_r &= U_{dr} i_{dr} + U_{qr} i_{qr}; \\
 q_r &= U_{qr} i_{dr} - U_{dr} i_{qr}; \\
 i_{ds} &= k_s \psi_{ds} - k_m \psi_{dr};
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$i_{qs} = k_s \psi_{qs} - k_m \psi_{qr};$$

$$i_{dr} = k_r \psi_{dr} - k_m \psi_{ds};$$

$$i_{qr} = k_r \psi_{qr} - k_m \psi_{qs};$$

$$p_{об} = p_s + p_r;$$

$$q_{об} = q_s + q_r.$$

В (1) обозначено: $\psi_{ds}, \psi_{qs}, \psi_{dr}, \psi_{qr}$ – потокосцепления статорных и роторных контуров по продольной и поперечной осям; $i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ – токи статорной и роторной обмоток по осям d и q ; U_s – амплитуда напряжения, подаваемого на статорную обмотку машины; k_{ur}, k_{fr} – амплитуда и частота регулируемого преобразователя частоты напряжения, подаваемого на роторную обмотку машины; s – скольжение машины, равное $s=1-\omega_r$; ω_r – угловая скорость вращения; θ – угол между осью ротора и синхронно (со скоростью $\omega_s=1$) вращающейся осью; $m_{вт}, m_{эм}$ – движущий момент приводного двигателя (например, водяной турбины) и электромагнитный момент АМДП; $U_{ds} = -U_s \sin\theta$, $U_{qs} = U_s \cos\theta$ – составляющие статорного напряжения по осям d и q ; $U_{dr} = -k_{ur} \sin(k_{fr}\tau)$, $U_{qr} = k_{ur} \cos(k_{fr}\tau)$ – составляющие роторного напряжения по осям d и q ; p_s, p_r – значения активных мощностей статорных и роторных контуров; q_s, q_r – значения реактивных мощностей статора и ротора; $p_{об}, q_{об}$ – общая активная и реактивная мощности АМДП; T_j – инерционная постоянная вращающихся частей приводного двигателя и АМДП; $\tau=314t$ – синхронное время, рад.

Коэффициенты k_s, k_r, k_m определяются из соотношений:

$$k_s = \frac{x_r}{x_r x_s - x_m^2}; \quad k_r = \frac{x_s}{x_r x_s - x_m^2}; \quad k_m = \frac{x_m}{x_r x_s - x_m^2}. \quad (2)$$

Параметры АМДП: r_s, r_r – активные сопротивления статорных и роторных обмоток; x_s, x_r – полные индуктивные сопротивления статорных и роторных контуров; x_m – сопротивление взаимной индукции между статорными и роторными контурами.

Необходимо отметить, что система (1) записана в осях d, q , вращающихся со скоростью ротора машины ω_r . Именно это обстоятельство позволяет в одной структуре математической модели реализовать режимы работы всех преобразований машины двойного питания в асинхронную машину с короткозамкнутым ротором, в синхронную машину с реализацией системы возбуждения по одной из осей (по оси d).

Расчеты проводились для АМДП с параметрами: $P_H=110$ кВт; $M_H=727,25$ Нм; $\cos\varphi=0,9$; $\eta=0,95$; $U_{баз}=311$ В; $I_{баз}=285$ А; $Z_{баз}=1,09$ Ом; $J=0,86$ кгм²; обмоточные данные, отн. ед.:

$r_s=0,01$; $r_r=0,03$; $x_s=4,878$; $x_r=4,9$; $x_m=4,8$; $x_{ох}=0,078$; $x_{ор}=0,1$ (сопротивления рассеяния статорной и роторной обмоток).

Значения параметров машины даны с учетом насыщения [8]. Ниже представлен алгоритм решения (программа Mathcad) с численными данными:

$$D(\tau, Y) = \begin{bmatrix} -1 \cdot \sin(Y_6) + Y_2 - Y_5 Y_2 - 0,01(5,69 Y_1 - 5,56 Y_3) \\ 1 \cdot \cos(Y_6) - Y_1 + Y_5 Y_1 - 0,01(5,69 Y_2 - 5,56 Y_4) \\ -k_{ur} \sin(k_{fr} \tau) - 0,03(5,66 Y_3 - 5,56 Y_1) \\ k_{ur} \cos(k_{fr} \tau) - 0,03(5,66 Y_4 - 5,56 Y_2) \\ 0,005 m_{вт} - 0,005 [Y_1 (5,69 Y_2 - 5,56 Y_4) - \\ - Y_2 (5,69 Y_1 - 5,56 Y_3)] \\ Y_5 \end{bmatrix},$$

где $Y_1 = \psi_{ds}$; $Y_2 = \psi_{qs}$; $Y_3 = \psi_{dr}$; $Y_4 = \psi_{qr}$; $Y_5 = s$; $Y_6 = \theta$; начальные значения всех переменных $Y_0=0$, кроме $Y_{05}=1$ (скольжение $s_0=0$).

Проиллюстрируем действие алгоритма в режиме работы асинхронной машины двойного питания с регулированием амплитуды и частоты тока в обмотке ротора. Машина запускается с закороченными обмотками ротора, т.е. при $k_{ur}=0$, и наличии на валу машины момента $m_{вд}=0,01$ (моделируется момент трения). Затем АМДП подключается к приводной турбине с моментом $m_{вд}=-0,75$ (знак минус указывает на генераторный режим), в это же время устанавливаются значения амплитуды и частоты роторного напряжения $k_{ur}=k_{fr}=-0,15$ (знак минус означает регулирование вверх от синхронной скорости).

На рис. 2,а–м показано изменение режимных параметров АМДП. Анализ флюктограмм показывает, что на первой стадии (пуск при закороченной накоротко обмотке ротора) на интервале времени $\tau=0 \div 500$ рад время переходного процесса составляет примерно 200 рад, установившиеся значения $m_{эм}=0,01$ (рис. 2,а), частота вращения $\omega_r=0,999$ (рис. 2,б), активная (рис. 2,д) и реактивная (рис. 2,е) мощности статорной обмотки соответственно равны $p_s=0,0105$ и $q_s=0,228$. Этим же значениям соответствуют значения общих мощностей машины $p_{об}=0,0152$ и $q_{об}=0,228$ (рис. 2,ж и з).

В интервале времени 500÷1000 рад при моменте приводной турбины $m_{вд}=-0,75$ параметры регулирования преобразователя частоты в роторной обмотке устанавливаются на значениях $k_{ur}=k_{fr}=-0,15$. При этом электромагнитный момент машины достигает значения $m_{эм}=-0,75$ (рис. 2,а), частота вращения становится равной $\omega_r=1,15$, значения активной и реактивной мощности роторных контуров машины $p_r=-0,08$ и $q_r=-0,13$ (отрицательные значения означают выда-

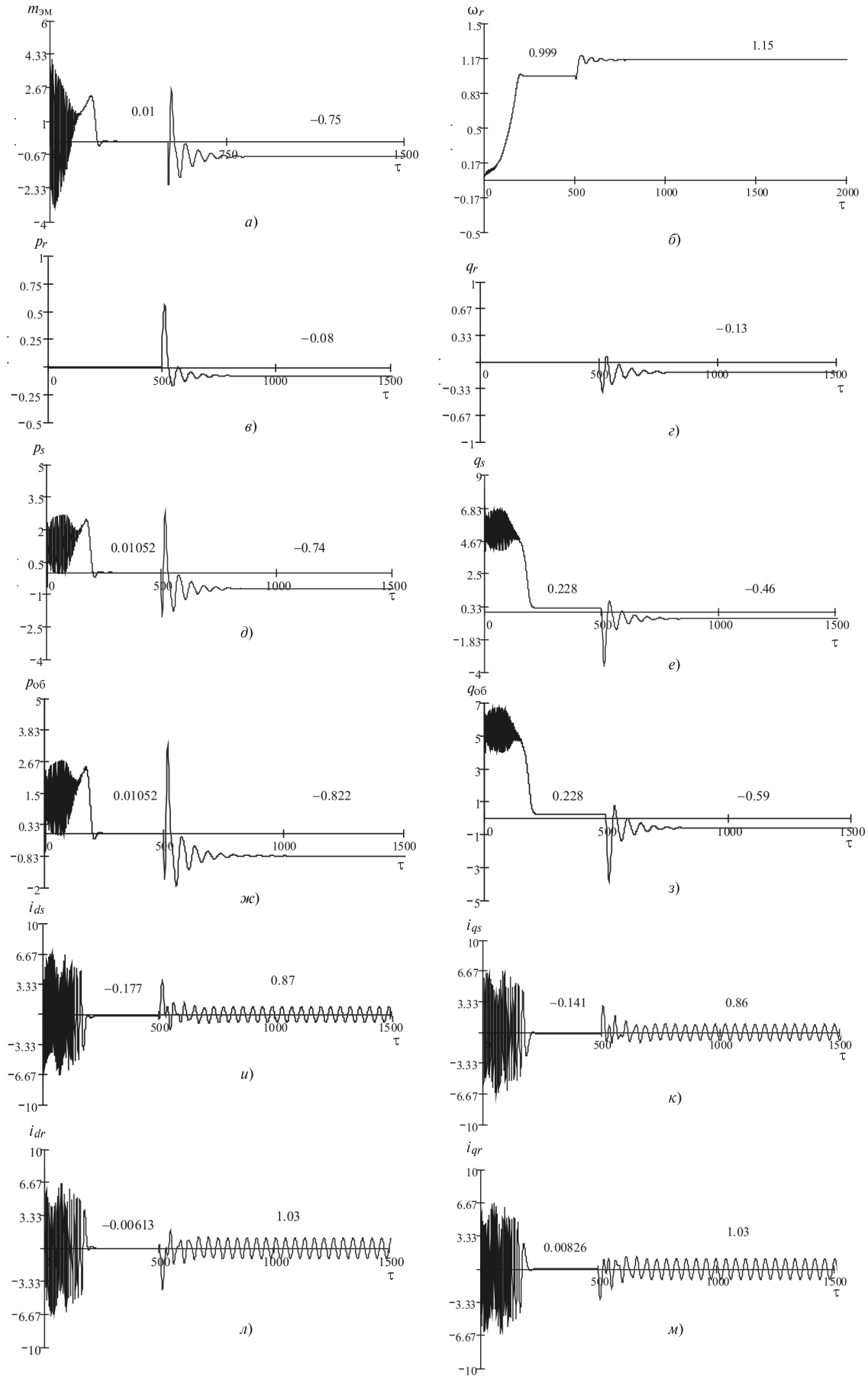


Рис. 2. Изменение режимных параметров асинхронной машины двойного питания при значении частоты в обмотке его ротора $k_{ur} = k_{fr} = -0,15$

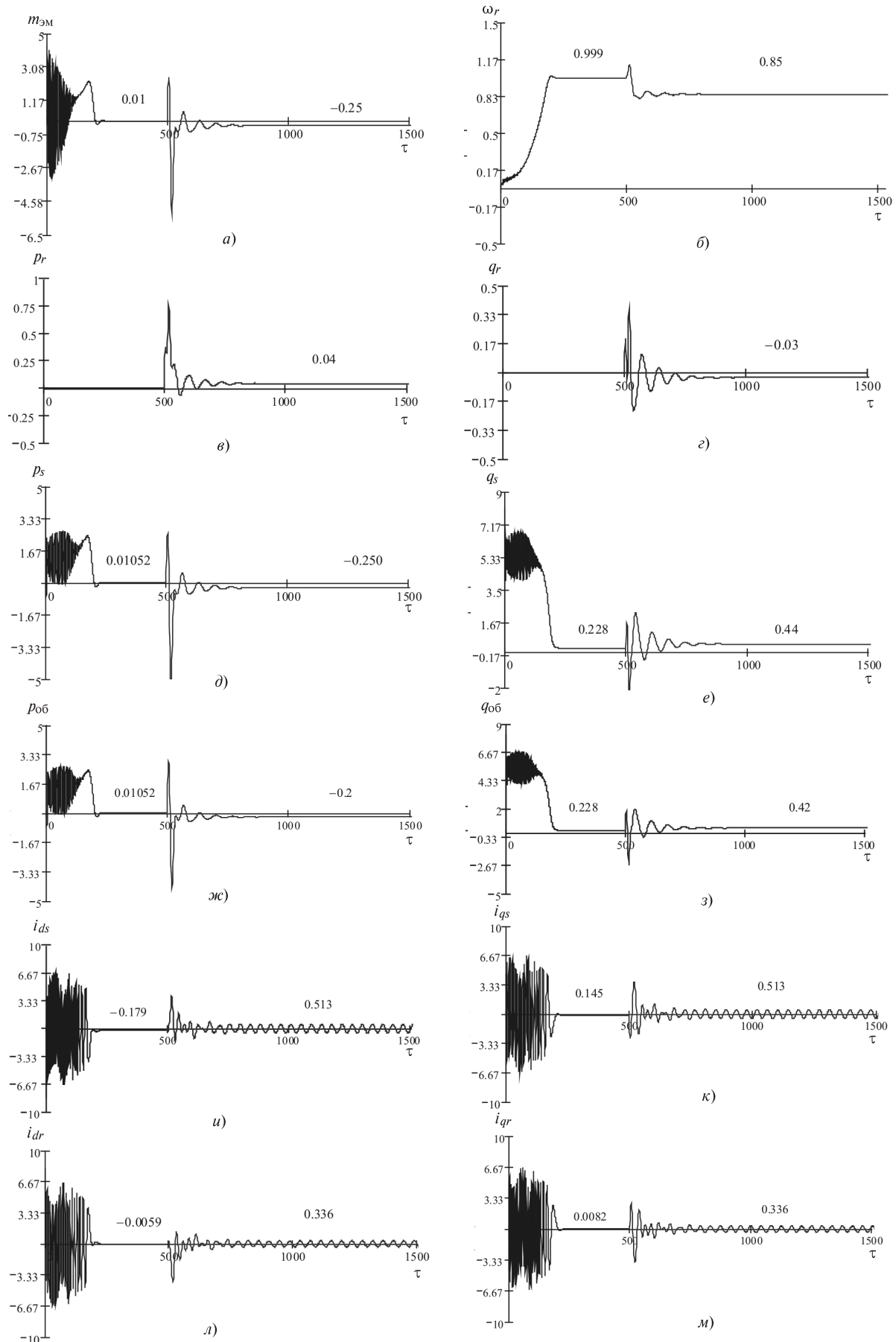


Рис. 3. Изменение режимных параметров асинхронной машины двойного питания при значении частоты в обмотке ротора $k_{ur} = k_{fr} = 0,15$

чу их в сеть) (рис. 2, в и г). Изменяются также значения мощностей статорных контуров $p_s = -0,74$ и $q_s = -0,46$ (рис. 2, д и е). Необходимо обратить внимание на то, что реактивная мощность статорной обмотки меняет знак (с плюса на минус), т.е. в этом случае реактивная мощность выдается в сеть; наконец, общие мощности становятся равными $p_{об} = -0,82$ и $q_{об} = -0,59$ (рис. 2, ж и з). На рис. 2, и и к представлены статорные токи i_{ds} и i_{qs} , амплитудные значения которых равны $\sim 0,87$ и $0,86$, и роторные токи i_{dr} и i_{qr} , значения которых по амплитуде равны $i_{dr\max} = i_{qr\max} \approx 1$, а частота $f_r = 0,15$ (рис. 2, л и м).

На флюктограммах рис. 3, а–м показано изменение тех же параметров, что и на рис. 2, только при положительных значениях $k_{ur} = k_{fr} = 0,15$ при $m_{вт} = -0,25$ (движущий момент приводной турбины). Здесь установившееся значение электромагнитного момента равно $m_{эм} = -0,25$ (рис. 3, а) и частоты вращения $\omega_r = 0,85$ (рис. 3, б), активные и реактивные значения мощности роторных и статорных контуров соответственно равны $p_r = 0,04$, $q_r = -0,03$, $p_s = -0,25$, $q_s = 0,44$ (рис. 3, в, г, д, е). Общие активная и реактивная мощности $p_{об} = -0,2$, $q_{об} = 0,42$ (рис. 3, ж и з). Необходимо отметить, что в этом случае генератор потребляет реактивную мощность из сети. И, наконец, токи в статорных и роторных обмотках $i_{ds} = i_{qs} = 0,513$ (рис. 3, и и к), $i_{dr} = i_{qr} = 0,336$ (рис. 3, л и м).

Таким образом, рис. 2 и 3 иллюстрируют режимы работы асинхронной машины, управляемой со стороны ротора преобразователем частоты, так сказать, по своему прямому назначению, т.е. в режиме регулирования частоты вращения генератора как вверх от синхронной скорости (т.е. от 1 до 1,15), так и вниз (т.е. от 1 до 0,85), при этом частота вращения должна регулироваться пропорционально изменению движущего момента генератора $m_{вт}$.

В режиме длительной работы в зоне околосинхронной частоты вращения, как было отмечено выше, возможны два варианта. Во-первых, можно вывести преобразователь частоты (рис. 1) из работы и закортить роторные обмотки, превратив таким образом АМДП в асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором. В этом случае уравнения (2) и (3) системы (1) предстанут в виде:

$$\begin{aligned} p\psi_{dr} &= -r_r i_{dr}; \\ p\psi_{qr} &= -r_r i_{qr}. \end{aligned} \quad (3)$$

Так как U_{dr} , U_{qr} и k_{ur} , k_{fr} равны нулю, из (1) исчезнут также уравнения для p_r и q_r .

Во вторых, можно и наиболее целесообразно «превратить» АМДП в синхронный генератор, для

этого в (1) те же уравнения (2) и (3) необходимо записать в виде:

$$\begin{aligned} p\psi_{dr} &= U_{df} - r_{df} i_{dr}; \\ p\psi_{qr} &= -r_{qr} i_{qr}. \end{aligned} \quad (4)$$

Таким образом, (1) в целом превращается в уравнения Горева–Парка с реализацией возбуждения U_{df} по продольной оси d машины.

В соответствии с рис. 1 постоянное напряжение U_{df} подается на начало роторной обмотки фазы A и на соединенные вместе начала фаз B и C , причем концы обмоток соединены вместе (нулевая точка), т.е. фазы B и C соединены между собой параллельно и последовательно с фазой A . При совмещении продольной оси d с осью обмотки фазы A с определенной погрешностью можно считать, что оси обмоток фаз B и C находятся на поперечной оси q . Поэтому сопротивления $r_{df} = r_{dr}$ (4) необходимо увеличить в 1,5 раза, т.е. $r_{df} = r_{dr} - 1,5r_r$, а сопротивление r_{qr} будет равно $r_{qr} = 2r_r$. С незначительной погрешностью можно считать, что в таком же соотношении меняются сопротивления рассеяния роторных контуров $x_{odr} = 1,5x_{or}$; $x_{oqr} = 2x_{or}$. Естественно, это повлечет за собой изменение полных сопротивлений роторных контуров x_{dr} и x_{qr} и значений k_s , k_r , k_m в (4).

С учетом параметров машины и схемы соединения роторной обмотки по рис. 1 связь токов с потокосцеплениями в этом режиме предстанет в следующем цифровом виде:

$$\begin{aligned} i_{ds} &= 4,5\psi_{ds} - 4,36\psi_{dr}; \\ i_{qs} &= 3,7\psi_{qs} - 3,55\psi_{qr}; \\ i_{dr} &= 4,43\psi_{dr} - 4,36\psi_{ds}; \\ i_{qr} &= 3,61\psi_{qr} - 3,55\psi_{qs}. \end{aligned} \quad (5)$$

Продемонстрируем вышеприведенные выкладки на той же математической модели АМДП.

На рис. 4, а–з представлены изменения электромагнитного момента машины $m_{эм}$, частоты его вращения ω_r , активной и реактивной мощности генератора p_s и q_s и токов статора i_{ds} и i_{qs} и ротора i_{dr} и i_{qr} .

Пуск осуществляется с учетом момента трения $m_{вт} = 0,01$ (т.е. практически вхолостую) в период времени $\tau = 0 \div 1000$ рад, частота вращения при этом $\omega_r = 0,999$. С $\tau = 1000$ до 2000 рад машина работает в режиме асинхронного генератора с закортенными обмотками ротора при движущем моменте приводного двигателя (турбины) $m_{вд} = -0,5$ (знак минус указывает на генераторный режим). В этом режиме электромагнитный момент $m_{эм} = -0,5$ (рис. 4, а), частота вращения $\omega_r = 1,0155$ (рис. 4, б),

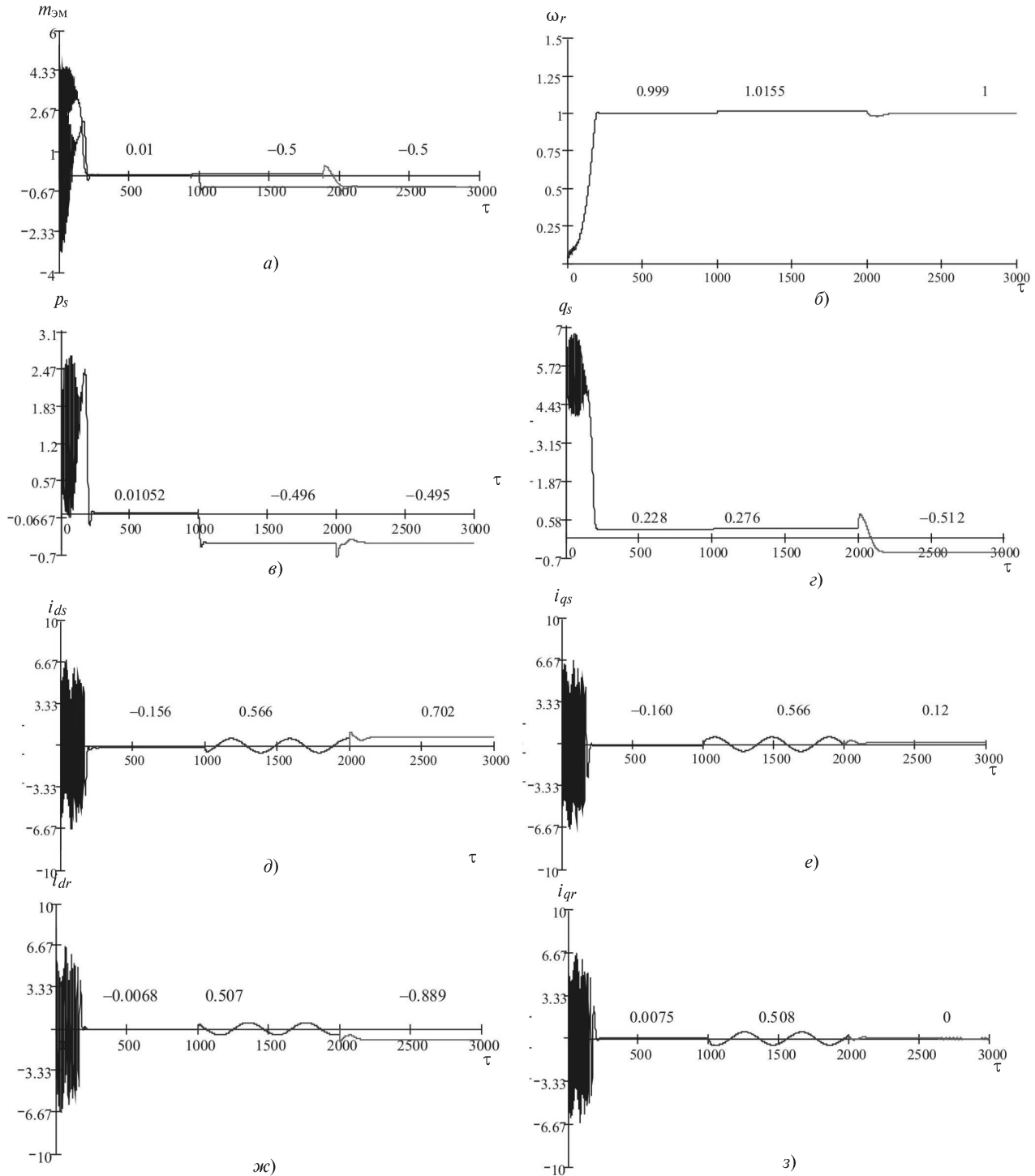


Рис. 4. Флуктограммы изменения режимных параметров асинхронной машины двойного питания при работе в синхронном режиме

значение $\omega_r > 1$ указывает на то, что машина работает в режиме генератора. Активная и реактивная мощности p_s и q_s равны $p_{об}$ и $q_{об}$ и в этом режиме достигают значений $p_s = -0,496$ и $q_s = 0,276$, причем реактивная мощность положительна, т.е. генератор потребляет реактивную мощность из сети (рис. 4, в и г). Токи статора i_{ds} и i_{qs} и ротора i_{dr} и i_{qr} в этом режиме переменны, амплитуда статорных токов не превышает значений $i_{ds} = i_{qs} = 0,566$, а роторных $i_{dr} = i_{qr} = 0,508$ (рис. 4, д, е и ж, з).

На флуктограммах того же рисунка в диапазоне времени $\tau = 2000 \div 3000$ рад происходит переход на синхронный режим работы машины, т.е. уравнения (2) и (3) системы (1) формируются по соотношениям (4) и (5). В этом диапазоне движущий момент остается тем же, т.е. $m_{вд} = -0,5$, соответственно ему $m_{ЭМ} = -0,5$, частота вращения строго равна $\omega_r = 1$, что указывает на синхронный режим. В (4) постоянное значение напряжения возбуждения для этой машины выбрано равным $U_{df} = -0,04$. При этом

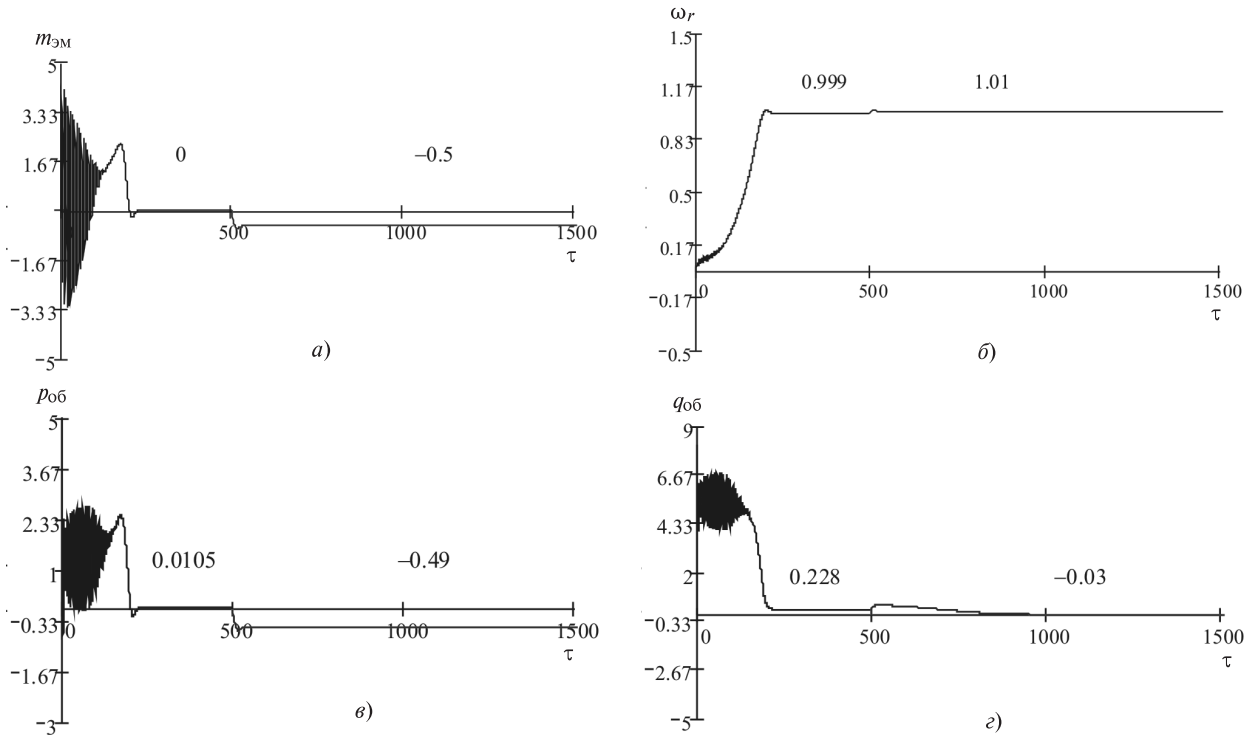


Рис. 5. Изменение режимных параметров асинхронной машины двойного питания при околосинхронной частоте вращения

значение активной мощности $p_s = -0,495$ (рис. 4, в), а реактивной $q_s = -0,512$ (рис. 4, г). Таким образом, машина работает в синхронном режиме с выдачей в сеть как активной мощности, так и значительной реактивной, которая чуть больше активной. Коэффициент мощности имеет емкостный характер и достигает значения $\cos\varphi_{уст} \approx 0,7$.

В синхронном режиме работы значения токов статора и ротора (рис. 4, д и е) не выходят за допустимые пределы. Ток возбуждения $i_{df} = i_{dr}$ устанавливается на уровне $i_{dr} = i_{df} = -0,889$ (рис. 4, ж), а ток i_{qr} , естественно, в этом режиме равен $i_{qr} = 0$ (рис. 4, з).

На конечном этапе исследований рассмотрим режим работы преобразователя частоты АМДП в околосинхронном режиме, т.е. постараемся ответить на вопрос, какие значения примут активная и реактивная мощности машины при малых значениях регулируемых параметром машины – амплитуды и частоты $k_{ur} = k_{fr}$ подводимого к обмотке ротора напряжения.

На флюктограммах рис. 5, а–г представлены кривые изменения $m_{ЭМ}$, частоты вращения ω_r , активной $p_{об}$ и реактивной $q_{об}$ мощности при значениях параметров управления $k_{ur} = k_{fr} = -0,01$ и $m_{вд} = -0,5$.

В диапазоне 500–1500 рад электромагнитный момент устанавливается на значении $m_{ЭМ} = -0,5$ (рис. 5, а), частота вращения $\omega_r = 1,01$ (рис. 5, б), активная и реактивная мощности $p_{об} = -0,49$,

$q_{об} \approx -0,03$ (рис. 5, в и г). Таким образом, в этом режиме преобразователь работает в штатном режиме, и выдача реактивной мощности практически равна нулю, т.е. генератор работает с коэффициентом мощности $\cos\varphi \approx 1$.

Резюмируя вышеизложенное, можно рекомендовать следующий алгоритм длительной работы АМДП (месяц, сезон) в режиме околосинхронной частоты вращения для средних значений движущего момента приводного двигателя. При необходимости выдачи в сеть значительной реактивной мощности следует перевести АМДП в режим работы чисто синхронного генератора с подачей возбуждения от регулируемого выпрямителя (рис. 1), при этом инвертор (И–В) выводится из схемы. При работе АМДП на частично компенсированную реактивной мощностью электрическую сеть необходимо оставить схему преобразователя частоты неизменной, обеспечить значениями параметров управления ($k_{ur} = k_{fr}$) околосинхронную частоту вращения, при этом в сеть не выдается и из сети не потребляется реактивная мощность ($\cos\varphi \approx 1$). Наконец, при значительной компенсации электрической сети по реактивной мощности необходимо полностью вывести из режима работы преобразователь частоты, а АМДП перевести в режим асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, в этом случае из сети будет потребляться реактивная мощность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Windenergил 2006. Heransgeber BWE-Service GmbH, April 2006.
2. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г. Моделирование динамических и статических режимов работы ВЭУ с асинхронной машиной двойного питания. — Электротехника, 2008, № 9, с. 11–15.
3. J.L. Da Silva, R.G. de Oliveira, S.R. Silva, B. Rabelo and W. Hofmann. A Discussion about a Start-up Procedure of a Doubly-Fed Induction Generator System. NORPIE/2008. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 9–11 June, 2008.
4. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М. Исследование статических и динамических характеристик гидроагрегатов малых ГЭС. — ЭЛЕКТРО, 2016, № 4, с. 17–21.
5. Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М., Мамедов Э.М., Набиев Х.И. Моделирование и исследование режимов работы гидроагрегатов малых ГЭС, содержащих в качестве ге-

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 10, pp. 60–68

нераторов машины двойного питания. — Изв. вузов. Электромеханика, 2015, № 6, с. 59–66.

6. Глебов И.А., Шулаков Н.В., Крутяков Е.А. Проблемы пуска сверхмощных синхронных машин. — Л.: Наука, 1988.

7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. — М.: Высшая школа, 2001, 327 с.

[05.12.2016]

А в т о р ы: Мустафаев Рауф Исмаил оглы, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела «Перспективное развитие электроэнергетики» Азербайджанского НИПИИЭнергетики, Баку.

Гасанова Ляман Гасан гызы, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела «Перспективное развитие электроэнергетики» Азербайджанского НИПИИЭнергетики, Баку.

DOI:10.24160/0013-5380-2017-9-60-68

Using a Controlled Double-Fed Asynchronous Machine in a Synchronous Mode

MUSTAFAYEV Rauf Ismail ogly (Azerbaijan Scientific-Research Design Institute of Power Engineering (ASRDIPE), Baku, Azerbaijan) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

GASANOVA Lyaman Gasan gyzy (ASRDIPE, Baku Azerbaijan) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

Owing to the rapid progress in converter engineering, double-fed machines made on the basis of a wound-rotor asynchronous machine are finding wide use both as generators (in wind power engineering and in small-scale hydraulic power engineering applications) and as motors for applications in which the rotation frequency has to be adjusted within a relatively narrow (30–40%) range, and in which certain limitations are imposed on the frequency converter power capacity. In a number of cases, the technology of using these machines as generators or motors dictates the need of running them with a close-to-synchronous rotation frequency, i.e., without adjusting it. Under such conditions, it is proposed to shift the machine in a synchronous mode of its operation by using only the frequency converter's rectifying part that supplies power to the wound-rotor asynchronous machine's (WRAM) rotor winding. The use of such solution will make it possible to generate a significantly larger reactive power into the electric network and to use the generator itself in a more efficient manner. The article presents the WRAM mathematical model that makes it possible to study, within the same structure, all WRAM operation modes, including the use of the machine for its direct purpose (adjusting the rotation frequency up and down with respect to its synchronous level), as a synchronous generator with generating significant reactive power to the network, and also as a squirrel-cage asynchronous generator. An analysis of the time curves obtained on the developed mathematical model has shown its high efficiency and adequacy. It also has shown that the proposed solution for switching a WRAM to operate in synchronous and asynchronous modes of operation is efficient and feasible.

Key words: double-fed asynchronous machine, synchronous generator, squirrel-cage asynchronous generator, synchronous mode of operation, rotation frequency adjustment, mathematical model

REFERENCES

1. Windenergил 2006. Heransgeber BWE-Service GmbH, April 2006.
2. Mustafayev R.I., Gasanova L.G. *Elektrotehnika — in Russ. (Power Engineering)*, 2008, No. 9, pp. 11–15.
3. J.L. Da Silva, R.G. de Oliveira, S.R. Silva, B. Rabelo and W. Hofmann. A Discussion about a Start-up Procedure of a Doubly-Fed Induction Generator System. — Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 9–11 June, 2008.
4. Mustafayev R.I., Gasanova L.G., Musayev M.M. *Elektro — in Russ. (Electro)*, 2016, No. 4, pp. 17–21.

5. Mustafayev R.I., Gasanova L.G., Musayev M.M., Mamedov E.M., Nabyev Kh.I. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika — in Russ. (News of Higher Education Institutions. Electromechanics)*, 2015, No. 6, pp. 59–66.

6. Glebov I.A., Shulakov N.V., Krutyakov E.A. *Problemy puskа sverkhmoshchnykh sinkhronnykh mashin* (Problems of launching heavy-duty synchronous machin). Leningrad, Publ. «Nauka», 1988.

7. Kopylov I.P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* (Mathematical modeling of electric machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 2001, 327 p.

[05.12.2016]