

Анализ эффективности работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором при скалярном частотном управлении

ГАСАНОВА Л.Г., МУСТАФАЕВ Р.И.

Приведена методика анализа эффективности функционирования частотно-управляемой асинхронной машины с короткозамкнутым ротором при скалярном управлении и обеспечении минимума потерь мощности в самой машине, а также постоянства значений перегрузочной способности и магнитного потока. Сущность предлагаемой методики состоит в сочетании расчетных значений параметров, полученных на математической модели машины при частотном управлении, с аналитическими выражениями, характеризующими составляющие потерь мощности. Это позволяет определять не только суммарные потери мощности в асинхронной машине при частотном управлении, но и изменения других режимных параметров машины, важнейшим из которых является значение потребляемой их сети реактивной мощности. Выявлено, что с учетом этих двух параметров, т.е. значений суммарных потерь мощности в машине и потребляемой реактивной мощности, наиболее целесообразным является регулирование на постоянства перегрузочной способности и магнитного потока при неизменном значении момента на валу машины. При вентиляторном характере момента на валу машины по совокупности потерь мощности и потребляемой реактивной мощности более эффективно применение закона регулирования на постоянство перегрузочной способности машины: $k_{us} = k'_n k_{fs} \omega_r$.

К л ю ч е в ы е с л о в а: асинхронная машина с короткозамкнутым ротором, математическая модель, движущий момент, скалярное частотное управление, минимум потерь мощности, постоянство перегрузочной способности, постоянство магнитного потока

Частотное управление электрическими машинами переменного тока в последние годы получило широкое распространение [1–3]. Из применяемых частотно-управляемых машин (асинхронных с короткозамкнутым и фазным роторами [4, 5], синхронных с электромагнитным возбуждением и постоянными магнитами [6, 7]) по простоте конструкции, высокой надежности и, что не менее важно, по стоимости наиболее предпочтительна асинхронная машина с короткозамкнутым ротором. Именно она, управляемая современным частотным преобразователем, базирующимся на полностью управляемых силовых IGBT-транзисторах или на GTO-тиристорах с системой управления на основе синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), и работающая на компенсированные по реактивной мощности электрические сети технически оснащенных энергосистем, должна найти приоритетное применение.

Известно, что частотное управление основано на двух принципах – векторном и скалярном. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Векторное управление, по своей сути, преобразует частотно-управляемую асинхронную машину в машину постоянного тока и позволяет при этом по-

лучить соответствующие регулировочные характеристики. Однако техническое воплощение этого принципа не лишено серьезных недостатков. Это прежде всего нестабильность некоторых параметров, которые входят в довольно сложную схему управления, базирующуюся на полной динамической модели самой машины. Другой способ реализации этого принципа требует измерения значений потокосцеплений во взаимно перпендикулярных осях d , q , что также трудноисполнимая по точности задача. Тем не менее, этот принцип управления совершенствуется и находит применение на практике.

Более простым и более надежным является скалярный принцип частотного управления, который был реализован в середине прошлого века и у истоков которого стояли крупные советские ученые [8–10]; этот метод получил наибольшее распространение.

В [10] приведены выражения скалярного метода управления, соответствующие изменению напряжения на зажимах асинхронной машины с короткозамкнутым ротором в функции частоты тока статора и обеспечивающие минимум потерь активной мощности в самой машине, сохранение по-

стоянства ее перегрузочной способности (закон М.П. Костенко) и сохранения неизменным значения магнитного потока в машине.

Цель настоящей статьи – проведение сопоставительного анализа вышеуказанных законов управления на разработанной авторами математической модели «состояния» частотно-управляемых асинхронных машин с короткозамкнутым ротором и последующей выдачей рекомендаций по их применению.

При обеспечении минимума потерь электрической мощности в асинхронной машине при частотном управлении в [10] приведено, а в [11] представлено в более удобном для анализа виде выражение $k_{us} = f(k_{fs})$:

$$k_{us} = k_{fs} \sqrt{m_{дв}} \sqrt[4]{\frac{k_{\Delta}}{(0,61 + 0,39k_{fs})k_{fs}}}, \quad (1)$$

где $k_{us} = U/U_{баз}$ – амплитуда напряжения, питающего статорную обмотку асинхронной машины, отн. ед.; $k_{fs} = f/f_{баз}$ – относительное значение частоты тока статора; $k_{\Delta} = \frac{\Delta p_{мш} + \Delta p_{доб.н}}{\Delta p_{ст.н}}$ – отношение потерь в статоре $\Delta p_{мш}$ вместе с добавочными $\Delta p_{доб.н}$ к потерям в стали статора $\Delta p_{ст.н}$ при номинальном режиме.

Второй закон частотного управления, предложенный академиком М.П. Костенко и обеспечивающий постоянство перегрузочной способности машины при любом значении частоты тока статора, представляется в виде:

$$k_{us} = k_{fs} \sqrt{m_{дв}}; \quad (2)$$

в (1) и (2) $m_{дв}$ – значение момента (сопротивления при работе в режиме двигателя или движущего при работе в режиме генератора) на валу асинхронной машины (отн. ед.).

И, наконец, третий закон – частотное управление на постоянство магнитного потока машины:

$$k_{us} = k_{fs}. \quad (3)$$

Как видно из (1)–(3), последний закон наиболее прост в реализации, поэтому наиболее распространен.

Как было определено выше, с помощью разработанной математической модели [12] и с учетом (1)–(3) будет проведен анализ потерь электрической мощности в режимах работы при постоянном и переменном (зависящем от частоты вращения машины) значении движущего момента на валу машины (в дальнейшем рассматривается работа машины в режиме генератора).

Уравнения частотно-управляемой электрической машины переменного тока в универсальной форме записи представлены в [12]. Для асинхронных машин с короткозамкнутым ротором они имеют вид:

$$\begin{aligned} p\Psi_{ds} &= 0,707k_{us} [\cos(k_{fs}\tau)(\cos\alpha - \sin\alpha - \sin(k_{fs}\tau) \times \\ &\times (\cos\alpha + \sin\alpha)) - \omega_r \Psi_{qs} - r_s i_{ds}; \\ p\Psi_{qs} &= 0,707k_{us} [\cos(k_{fs}\tau)(\cos\alpha + \sin\alpha + \sin(k_{fs}\tau) \times \\ &\times (\cos\alpha - \sin\alpha)) + \omega_r \Psi_{ds} - r_s i_{qs}; \\ p\Psi_{dr} &= -r_r i_{dr}; \\ p\Psi_{qr} &= -r_r i_{qr}; \\ T_j \omega_r &= m_{дв} - m_{эм}; \\ m_{эм} &= \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения для составляющих токов статора и ротора i_{ds} , i_{qs} и i_{dr} , i_{qr} связаны с соответствующими потокосцеплениями соотношениями:

$$\begin{aligned} i_{ds} &= k_s \Psi_{ds} - k_m \Psi_{dr}; \\ i_{qs} &= k_s \Psi_{qs} - k_m \Psi_{qr}; \\ i_{dr} &= k_r \Psi_{dr} - k_m \Psi_{ds}; \\ i_{qr} &= k_r \Psi_{qr} - k_m \Psi_{qs}. \end{aligned} \quad (5)$$

В свою очередь, коэффициенты k_s , k_r и k_m определяются по паспортным данным машины:

$$k_s = \frac{x_r}{x_s x_r x_m^2}; \quad k_r = \frac{x_s}{x_s x_r x_m^2}; \quad k_m = \frac{x_m}{x_s x_r x_m^2}. \quad (6)$$

В (4)–(6) Ψ_{ds} , Ψ_{qs} , Ψ_{dr} , Ψ_{qr} – потокосцепления статорных и роторных контуров по осям d , q ; i_{ds} , i_{qs} , i_{dr} , i_{qr} – составляющие токов статора и ротора по осям d , q ; $m_{эм}$ – электромагнитный момент машины; T_j – инерционная постоянная ротора машины совместно с сочлененным агрегатом (при работе генератором – с турбиной, при работе двигателем – с приводным механизмом); $m_{дв}$ – значение момента сочлененного агрегата; r_s , r_r , x_s , x_r , x_m – активные и полные индуктивные сопротивления статорных и роторных контуров, а также сопротивление взаимной индукции. Необходимо напомнить, что приведенные алгебродифференциальные уравнения записаны в осях d , q , вращающихся со скоростью ротора ω_r . Для полноты анализа к этим уравнениям необходимо добавить уравнения значений активной и реактивной мощности машины:

$$\begin{aligned} p_s &= U_{ds} i_{ds} + U_{qs} i_{qs}; \\ q_s &= U_{qs} i_{ds} - U_{ds} i_{qs}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$U_{ds} = 0,707k_{us} [\cos(k_{fs}\tau)(\cos\alpha - \sin\alpha - \sin(k_{fs}\tau) \times (\cos\alpha + \sin\alpha));$$

$$U_{qs} = 0,707k_{us} [\cos(k_{fs}\tau)(\cos\alpha + \sin\alpha + \sin(k_{fs}\tau) \times (\cos\alpha - \sin\alpha)].$$

При необходимости насыщение машины можно учесть известными методами, например приведенными в [13, 14].

На рис. 1, а, б, в, г, д, е приведены осциллограммы изменения режимных параметров асинхронной машины (серия 4А112М4), работающей в генераторном режиме при $k_{us} = k_{fs} = 1$, параметры которой приведены в *Приложении* (п. а). Рисунок показывает, что после разгона в асинхронном режиме (диапазон от 0 до ~500 рад) под действием движущего момента $m_{дв} = -0,83$ (знак минус указывает на генераторный режим) машина переходит в генераторный режим. На рис. 1, а частота вращения ротора достигает в установившемся режиме значения $\omega_r = 1,067$ (т.е. становится больше 1, что также указывает на генераторный режим). На рис. 1, б представлен электромагнитный момент $m_{эм}$, который после асинхронного пуска достигает в установившемся режиме значения $m_{эм} = -0,83$. На рис. 1, в и г представлены значения активной мощности на выходе генератора p_s и реактивной мощности q_s , формируемые по (7): $p_s = -0,753$; $q_s = 0,548$ (положительный знак q_s показывает, что машина, выдавая в сеть активную мощность, потребляет из сети реактивную мощность q_s).

Наконец, на рис. 1, д и е изображены токи статора и ротора:

$$i_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2}; \quad i_r = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2}. \quad (8)$$

С учетом базовых значений, приведённых в *Приложении* (п. б) для подтверждения адекватности математической модели, переведем некоторые установившиеся относительные значения параметров режима в абсолютные. Таким образом, активная мощность с учетом базового значения мощности машины $S_{баз} = 7300,5$ Вт станет равной $P_s = p_s S_{баз} = 0,753 \cdot 7300,5 = 5497$ Вт, т.е. с большой точностью приближается к $P_H = 5,5$ кВт. Кроме того, если определять общую мощность по известному выражению $s_s = \sqrt{p_s^2 + q_s^2} = \sqrt{0,753^2 + 0,548^2} = 0,931$, то значение с большой точностью совпадает со значением, определенным по выражению $s_s = u_s i_s = 1,0 \cdot 0,931 = 0,931$.

Необходимо обратить внимание еще на одно обстоятельство. В *Приложении* (п. в) приведены потери мощности для исследуемой асинхронной ма-

шины в номинальном режиме, которые состоят из добавочных $\Delta p_{доб}$, механических $\Delta p_{мех}$, потерь в стали статора $\Delta p_{ст}$ и в меди статора и ротора $\Delta p_{МС}$ и $\Delta p_{Мр}$.

Вышеприведенная система уравнений, что логично вытекает из ее структуры, не учитывает добавочные, механические потери и потери в стали, но учитывает потери в меди статора и ротора. В этом легко убедиться благодаря следующим выкладкам. Если движущий (или тормозной при работе двигателем) момент на валу машины $m_{дв}$ умножить на частоту вращения ротора ω_r , то получим выражение для механической мощности на валу генератора, т.е.

$$P_{мех} = m_{дв} \omega_r. \quad (9)$$

По данным осциллограмм эта мощность равна $P_{мех} = m_{дв} \omega_r = 0,83 \cdot 1,067 = 0,885$ отн. ед. Потери в обмотках статора и ротора с учетом значений их активных сопротивлений, равных $r_s = 0,089$ и $r_r = 0,085$, при значениях токов статора $i_s = 0,931$ ($i_s^2 = 0,8667$) и ротора $i_r = 0,808$ ($i_r^2 = 0,6528$) составят соответственно $i_s^2 r_s = 0,077$ и $i_r^2 r_r = 0,055$.

Выражение для активной мощности, отдаваемой в сеть,

$$p_s = P_{мех} - i_s^2 r_s - i_r^2 r_r; \quad (10)$$

для исследуемого генератора

$$p_s = 0,885 - 0,077 - 0,055 = 0,753.$$

Таким образом, вышеприведенные дифференциальные уравнения, базирующиеся на уравнениях Горева–Парка, и любые другие их модификации не могут учитывать такие потери мощности в машинах (асинхронных и синхронных), как добавочные, механические и потери в стали статора, и тем более их зависимости от регулируемых значений амплитуды и частоты напряжения, подводимого к статорной обмотке машин при частотном управлении.

В дальнейшем, используя (1)–(3) вместе с алгебродифференциальными уравнениями асинхронного генератора (4), для различных постоянных значений движущего момента, а также при вентиляторном характере его изменения получим установившиеся значения параметров машины при различных значениях частоты тока статора (изменяется дискретно от 1 до 0,11); для этих значений частоты будут дополнительно рассчитаны потери мощности, которые не отражают вышеприведенные уравнения, а именно, добавочные потери мощности $\Delta p_{доб}$, механические потери $\Delta p_{мех}$, и потери мощности в стали статора генератора $\Delta p_{ст}$.

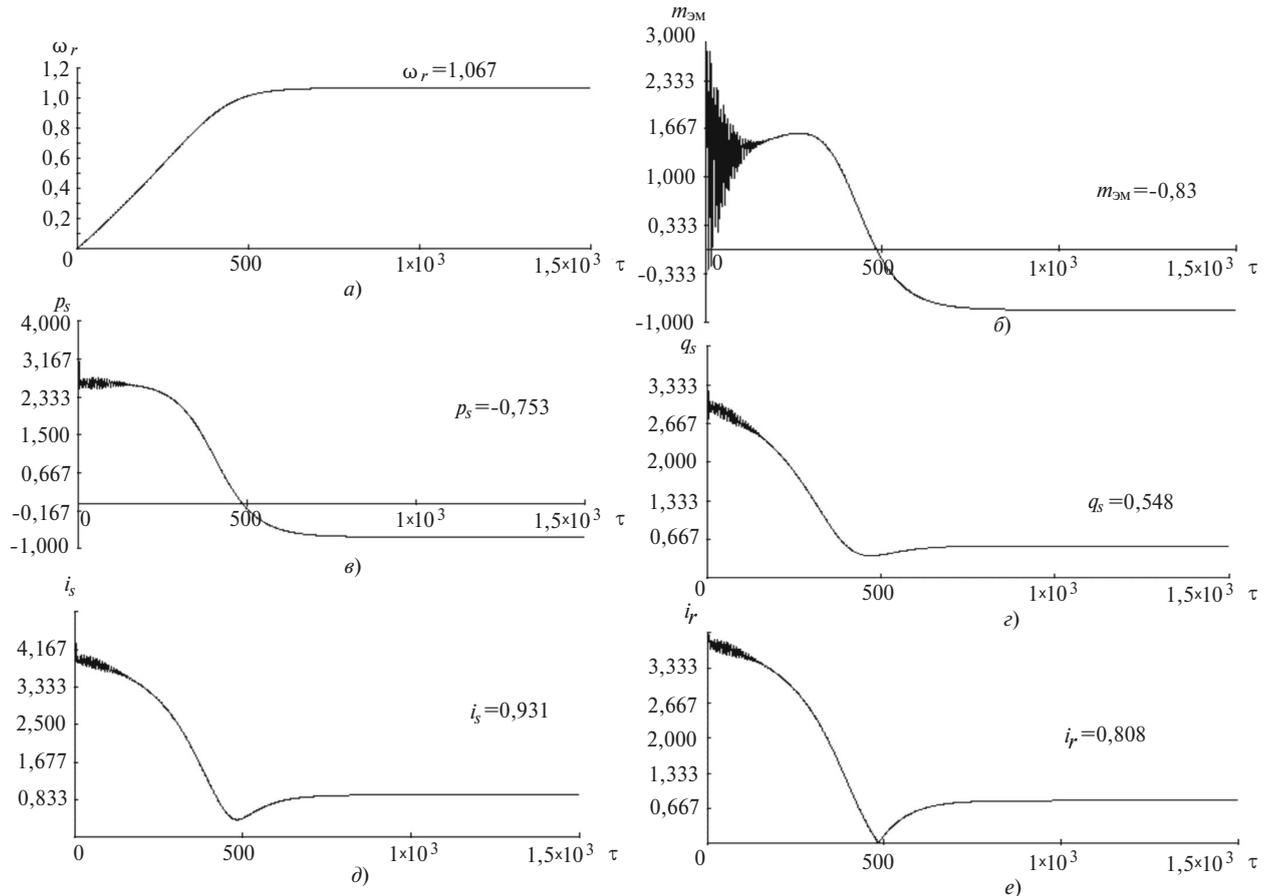


Рис. 1. Осциллограммы изменения режимных параметров асинхронной машины (серия 4А112М4), работающей в генераторном режиме

Проанализируем изменения этих потерь в функции амплитуды и частоты напряжения подведенного к статору генератора. Что касается добавочных потерь мощности $\Delta p_{доб}$, то в технической литературе нет данных об их изменении в функции напряжения и частоты, поэтому в дальнейшем целесообразно считать их неизменными при различных значениях амплитуды и частоты подводимого к генератору напряжения.

Механические потери в [10] определяются в функции частоты тока статора с учетом того, что частота вращения однозначно зависит от частоты тока статора. При наличии математической модели целесообразно установить прямую зависимость $\Delta p_{мех}$ от частоты вращения ротора машины, т.е.

$$\Delta p_{мех} = \Delta p_{мех.н} \omega_r. \tag{11}$$

Наконец, потери в стали статора частотноуправляемой асинхронной машины с короткозамкнутым ротором [10]:

$$\Delta p_{ст} = \Delta p_{ст.н} (0,61 + 0,39k_f) \frac{k_u^2}{k_f}. \tag{12}$$

Из математической модели при различных законах управления $k_{us} = f(k_{fs})$ (1)–(3) определяются режимные параметры: напряжение k_{us} , частота

вращения ротора ω_r , значения мощности на зажимах генератора – активной p_s и реактивной q_s , тока статора и ротора (по (8)). Таким образом, потери рассчитываются с использованием выражений для токов i_s и i_r , а также по (11) и (12).

В табл. 1 и 2 представлены результаты моделирования и расчета потерь мощности для постоянного момента $m_{дв} = -0,83$, а при вентиляторном характере изменения движущего момента $m_{дв} = 0,729\omega_r^2$.

Анализ приведенных результатов показал следующее. Как и следовало ожидать, минимум потерь мощности получен при законе регулирования на минимум потерь – формула (1); второе место по минимуму потерь занимает закон регулирования на постоянство магнитного потока. Однако это обстоятельство еще не указывает на абсолютную эффективность первого закона регулирования, поскольку в понятие эффективность еще входит значение потребляемой из сети реактивной мощности. По этому показателю (минимуму потребления реактивной мощности) первое место отводится закону регулирования на постоянство перегрузочной способности, а второе – закону регулирования на постоянство магнитного потока машины.

Результаты моделирования и расчета потерь мощности при постоянном вращающемся моменте

$$m_{\text{дв}} = -0,83$$

Регулирование на минимум потерь, формула (1)						
k_{fs}	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,11
k_{us}	1,15	0,99	0,82	0,62	0,38	0,24
ω_r	1,052	0,844	0,636	0,428	0,218	0,123
p_s	0,763	0,601	0,438	0,273	0,098	0,009
q_s	0,65	0,57	0,5	0,42	0,3	0,23
i_s	0,868	0,84	0,819	0,818	0,874	0,931
i_r	0,712	0,657	0,594	0,52	0,42	0,36
Расчет потерь						
Δp_{MS}	0,067	0,06	0,0597	0,059	0,068	0,082
Δp_{MR}	0,043	0,0367	0,03	0,023	0,015	0,011
$\Delta p_{\text{доб}}$	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
$\Delta p_{\text{мех}}$	0,0079	0,006	0,0048	0,0032	0,0016	0,001
$\Delta p_{\text{ст}}$	0,038	0,0327	0,027	0,021	0,014	0,01
$\Sigma \Delta p$	0,159	0,142	0,125	0,11	0,102	0,107
Регулирование на постоянство перегрузочной способности, (2)						
k_{us}	0,911	0,729	0,547	0,364	0,18	0,11
ω_r	1,079	0,877	0,67	0,46	0,25	0,15
p_s	0,743	0,579	0,416	0,255	0,098	0,029
q_s	0,508	0,412	0,316	0,22	0,125	0,08
i_s	0,988	0,976	0,957	0,927	0,873	0,84
i_r	0,88	0,864	0,84	0,8	0,72	0,65
Расчет потерь						
Δp_{MS}	0,0868	0,0848	0,081	0,076	0,0678	0,0626
Δp_{MR}	0,0658	0,0634	0,06	0,054	0,044	0,0366
$\Delta p_{\text{доб}}$	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
$\Delta p_{\text{мех}}$	0,0081	0,00658	0,005	0,0035	0,0019	0,0011
$\Delta p_{\text{ст}}$	0,024	0,0177	0,012	0,00736	0,0033	0,0017
$\Sigma \Delta p$	0,188	0,176	0,162	0,145	0,12	0,106
Регулирование на постоянство магнитного потока, (3)						
k_{us}	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,11
ω_r	1,067	0,865	0,66	0,457	0,247	0,15
p_s	0,753	0,588	0,424	0,26	0,102	0,03
q_s	0,548	0,446	0,34	0,24	0,136	0,08
i_s	0,931	0,923	0,91	0,888	0,85	0,826
i_r	0,808	0,796	0,777	0,746	0,679	0,622
Расчет потерь						
Δp_{MS}	0,077	0,075	0,073	0,07	0,064	0,0607
Δp_{MR}	0,055	0,0538	0,051	0,047	0,039	0,0329
$\Delta p_{\text{доб}}$	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
$\Delta p_{\text{мех}}$	0,008	0,0065	0,0049	0,0034	0,0018	0,0011
$\Delta p_{\text{ст}}$	0,0295	0,021	0,0147	0,0089	0,004	0,00208
$\Sigma \Delta p$	0,173	0,16	0,148	0,133	0,112	0,1

Результаты моделирования и расчета потерь мощности при вентиляторном характере его изменения

$$m_{ДВ} = k_n \omega_r^2 = 0,729 \omega_r^2$$

Регулирование на минимум потерь						
k_{fs}	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,11
k_{us}	1,129	0,782	0,486	0,247	0,077	0,029
ω_r	1,052	0,844	0,636	0,428	0,218	0,126
p_s	0,753	0,382	0,158	0,045	0,0043	0,00035
q_s	0,62	0,358	0,179	0,068	0,0133	0,003
i_s	0,866	0,671	0,49	0,33	0,18	0,118
i_r	0,713	0,528	0,36	0,211	0,087	0,051
Расчет потерь						
Δp_{MS}	0,0667	0,04	0,021	0,0097	0,0029	0,0011
Δp_{MR}	0,043	0,0237	0,011	0,00378	0,00064	0,00022
$\Delta p_{доб}$	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
$\Delta p_{мех}$	0,00789	0,0063	0,0048	0,0032	0,00159	0,00095
$\Delta p_{СТ}$	0,0369	0,0174	0,0096	0,0039	0,0006	0,00015
$\Sigma \Delta p$	0,158	0,09	0,05	0,024	0,0094	0,0061
Регулирование на постоянство перегрузочной способности						
k_{us}	0,921	0,599	0,344	0,159	0,044	0,014
ω_r	1,079	0,877	0,672	0,466	0,256	0,152
p_s	0,76	0,39	0,165	0,049	0,006	0,00068
q_s	0,52	0,278	0,126	0,042	0,007	0,0017
i_s	1	0,801	0,603	0,406	0,208	0,129
i_r	0,89	0,71	0,53	0,351	0,172	0,098
Расчет потерь						
Δp_{MS}	0,089	0,057	0,032	0,0147	0,00385	0,00148
Δp_{MR}	0,067	0,043	0,0239	0,01	0,0025	0,00081
$\Delta p_{доб}$	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
$\Delta p_{мех}$	0,0081	0,0065	0,005	0,0035	0,00192	0,00114
$\Delta p_{СТ}$	0,0246	0,012	0,0048	0,0014	0,00019	0,000033
$\Sigma \Delta p$	0,19	0,122	0,069	0,033	0,012	0,0071
Регулирование на постоянство магнитного потока						
k_{us}	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,11
ω_r	1,067	0,842	0,624	0,411	0,203	0,111
p_s	0,752	0,375	0,149	0,035	0,0055	0,0009
q_s	0,548	0,369	0,25	0,157	0,074	0,039
i_s	0,931	0,658	0,485	0,402	0,373	0,359
i_r	0,807	0,507	0,281	0,124	0,031	0,01
Расчет потерь						
Δp_{MS}	0,077	0,0385	0,021	0,014	0,0124	0,011
Δp_{MR}	0,055	0,0218	0,0067	0,0013	0,000081	0,000008
$\Delta p_{доб}$	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037	0,0037
$\Delta p_{мех}$	0,008	0,0063	0,0047	0,0031	0,0015	0,00083
$\Delta p_{СТ}$	0,029	0,021	0,0146	0,0089	0,004	0,0021
$\Sigma \Delta p$	0,17	0,09	0,05	0,03	0,021	0,017

Таким образом, учитывая эти два параметра — минимум потерь мощности в самой машине и минимум потребляемой реактивной мощности, — с учетом простоты технической реализации закон регулирования на постоянство потока оказывается предпочтительнее при постоянстве $m_{дв} = 0,83$.

При вентиляторном характере изменения движущего момента по минимуму потерь мощности на первое место следует поставить закон регулирования на минимум потерь, на второе в диапазоне изменения частоты от $k_{fs} = 1$ по $k_{fs} = 0,4$ — закон на постоянство перегрузочной способности.

Однако в диапазоне изменения частоты тока статора от $k_{fs} = 0,4$ до $k_{fs} = 0,11$ закон регулирования на постоянство перегрузочной способности практически незначительно по потерям мощности отличается от закона регулирования на минимум потерь. В то же время по минимуму потребляемой реактивной мощности он является приоритетным по сравнению с другими законами. Таким образом, в этом случае с учетом вышеизложенного закон регулирования на постоянство перегрузочной способности предпочтительнее двух других законов. Что касается его технической реализации, то она, конечно, чуть сложнее реализации закона регулирования на постоянство потока, но закон вполне реализуем при вентиляторном характере движущего момента:

$$\begin{aligned} k_{us} &= k_{fs} \sqrt{m_{дв}} = k_{fs} \sqrt{k_n \omega_r^2} = \\ &= \sqrt{k_n} k_{fs} \omega_r = k'_n k_{fs} \omega_r, \end{aligned} \quad (12)$$

где $k'_n = \sqrt{k_n}$.

Следовательно, необходимо дополнительное измерение частоты вращения ротора ω_r и перемножение её со значением частоты тока статора с учетом соответствующего коэффициента пропорциональности, а затем формирование амплитуды напряжения статора генератора.

На рис. 2 и 3 представлены кривые регулирования амплитуды статорного напряжения частотно-управляемого асинхронного генератора при обеспечении минимума потерь мощности (кривая 1), постоянства перегрузочной способности (кривая 2) и постоянства магнитного потока (кривая 3) соответственно для $m_{дв} = -0,83$ и $m_{дв} = k_n \omega_r^2 = 0,729 \omega_r^2$.

Как видно, характеристики 2 и 3 на рис. 2 прямые, характеристика 1 криволинейна. При вентиляторном характере изменения движущего момента кривые 1 и 3 (рис. 3) существенно нелинейны, при этом нелинейность кривой k_{us} , обеспечивающей постоянство перегрузочной способно-

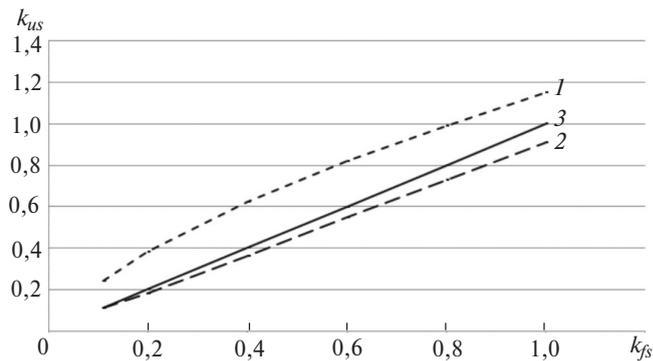


Рис. 2. Изменение амплитуды напряжения статора при регулировании на минимум потерь (кривая 1), на постоянство перегрузочной способности (кривая 2) и на постоянство магнитного потока (кривая 3) при $m_{дв} = -0,83$

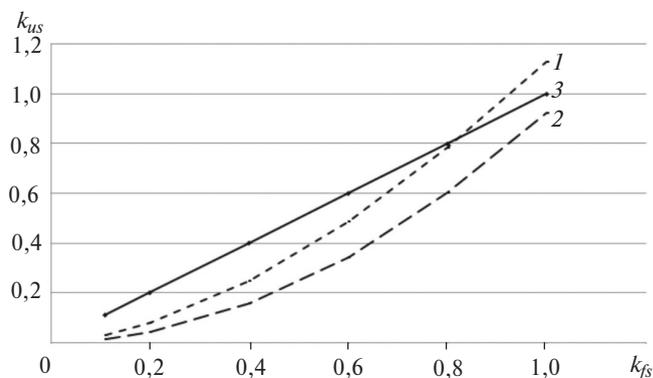


Рис. 3. Изменение амплитуды статорного напряжения при регулировании на минимум потерь (кривая 1), на постоянство перегрузочной способности (кривая 2) и на постоянство магнитного потока (кривая 3) при вентиляторном характере движущего момента $m_{дв} = k_n \omega_r^2$

сти, легко реализуется аналитическим выражением вида (12).

В заключение следует отметить, что при недогруженной машине (например, при $m_{дв} = -0,3$) практически во всем диапазоне изменений частоты k_{fs} при законе регулирования на постоянство потока обеспечиваются потери мощности, практически равные потерям мощности при регулировании на минимум потерь. Однако потребляемая реактивная мощность во всем диапазоне изменения частоты имеет наименьшие значения при законе регулирования на постоянство перегрузочной способности.

Приложение: а) данные асинхронной машины 4А 112 М4:

$P=5,5$ кВт;	$r_s = 1,75$ Ом;	$s_n = 0,035$; $\eta = 0,814$;
$U_{нф} = 220$ В;	$r_r = 1,67$ Ом;	$GD^2 = 0,0824$ кг·м ² ;
$I_{нф} = 11,1$ А;	$x_{1\sigma} = 1,439$ Ом;	$J = 0,0206$ кг·м ² ;
$\cos \alpha = 0,81$;	$x_{2\sigma} = 2,35$ Ом;	$x_m = 51,5$ Ом;

б) базовые величины:

$$\begin{aligned} U_{\text{баз}} &= 310 \text{ В}; & Z_{\text{баз}} &= U_{\text{баз}} / I_{\text{баз}} = 310 / 15,7 = 19,7; \\ I_{\text{баз}} &= 15,65 \text{ А}; & t_{\text{баз}} &= 1 / \omega_{\text{баз}} = 0,00318; \\ \omega_{\text{баз}} &= 314 \text{ 1/с}; & M_{\text{баз}} &= S_{\text{баз}} / \omega_{\text{баз}} = 23,25 \text{ Н·м}; \end{aligned}$$

параметры номинального режима, отнесенные к базисной мощности,

$$Z_{\text{баз}} = \frac{2}{3} U_{\text{баз}} I_{\text{баз}} = 7300,5 \text{ Вт.}$$

в) потери мощности в номинальном режиме:

дополнительные	$\Delta P_{\text{доб.н}} = 27 \text{ Вт};$
механические	$\Delta P_{\text{мех}} = 55 \text{ Вт};$
потери в стали	$\Delta P_{\text{ст}} = 215 \text{ Вт};$
потери в обмотке статора	$\Delta P_{\text{э1}} = 562 \text{ Вт};$
потери в меди ротора	$\Delta P_{\text{э2}} = 405 \text{ Вт};$
суммарные потери	$\Delta P_{\text{н}} = 1264 \text{ Вт};$

г) параметры (отн.ед.)

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{1,75}{19,7} = 0,089; & x_{\text{ос}} &= \frac{1,439}{19,7} = 0,073; & r_r &= \frac{1,67}{19,7} = 0,085; \\ x_{\text{ор}} &= \frac{2,35}{19,7} = 0,119; & x_m &= \frac{51,5}{19,7} = 2,614; \end{aligned}$$

полные индуктивные сопротивления (насыщенные значения):

$$x_s = x_{\text{ос}} + x_m = 0,073 + 2,614 = 2,687;$$

$$x_r = x_{\text{ор}} + x_m = 0,119 + 2,614 = 2,733;$$

$$T_j \approx 1000; \quad \frac{1}{T_j} = 0,001; \quad k_s = 5,353; \quad k_r = 5,263;$$

$$k_M = 5,12 \text{ (определяются по (6)).}$$

Выводы. 1. Для анализа эффективности режимов работы частотно-управляемых асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами при скалярном управлении целесообразно использовать данные расчетов, полученные на предложенной математической модели, вкпе с данными аналитических расчетов других, не учтенных на модели, видов потерь мощности.

2. При выборе закона управления амплитудой напряжения статора машины необходимо учитывать не только обеспечение минимума потери мощности в самой асинхронной машине, но обязательно минимум потребляемой реактивной мощности, так как эта мощность определяет дополнительные потери энергии в сетях, к которым подключены эти машины.

3. По вышеуказанным критериям наиболее целесообразно применение двух законов управления – регулирование на постоянство перегрузочной способности и регулирование на постоянство магнитного потока. По простоте исполнения предпоч-

тителен последний закон управления, но при вентиляторном характере изменения момента более эффективен закон регулирования на постоянство перегрузочной способности, который определяется по выражению $k_{us} = k'_n k_{fs} \omega_r$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гузев Б.В., Хакимьянов М.И.** Современные промышленные высоковольтные преобразователи частоты для регулирования асинхронных и синхронных двигателей. – Нефтегазовое дело (электронный научный журнал), 2011, № 3, с. 441–450.
2. **Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г.** Моделирование и исследование квазистационарных режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами при частотном управлении. – Электричество, 2009, № 6, с. 36–42.
3. **Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М.** Применение регулируемых электрических машин в гидроагрегатах малых ГЭС, работающих на энергосистему. – Электротехника, 2018, № 5, с. 38–44.
4. **Ekanayake J.B., Holdsworth L., Wu X., Jenkins N.** Dynamic modeling of doubly-fed induction generator wind turbines. – IEEE Trans. Power Syst., 2003, vol. 18, No. 2, pp. 803–809.
5. **Alghuwainem S.M., Hammouda R.A., Al-Farhan A.R. M.** Transient analysis of a wind-driven induction generator/in Proc. Canadian Conf. Electrical Computer Engineering, 2001, pp. 13–16.
6. **Parviainen A., Niemela M., Pyrhonen J.** Modeling of axial flux permanent-magnet machines. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, vol.40, No. 5, pp. 1333–1340.
7. **Giulii Capponi F., De Donato G., Caricchi F.** Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, No. 6, pp. 2190–2205.
8. **Костенко М.П.** Электрические машины. Специальная часть. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1949, 712 с.
9. **Булгаков А.А.** Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Наука, 1966, 216 р.
10. **Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей, изд. 4-е. М.: Энергоатомиздат, 1984, 239 с.
11. **Расулов М.М., Мустафаев Р.И.** Статические характеристики системы асинхронный двигатель–синхронный генератор соизмеримой мощности при частотном управлении. – Электротехника, 1970, № 11, с. 3–5.
12. **Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г.** Универсальная структура математической модели управляемых электрических машин переменного тока. – Электричество, 2015, № 2, с. 40–48.
13. **Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах/Под ред. Н.И. Соколова.** М.: Энергия, 1964, 408 с.
14. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов, 3-е изд. М.: Высшая школа, 2001, 327 с.

[25.07.2018]

А в т о р ы: Гасанова Ляман Гасан гызы, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела «Перспективное развитие электроэнергетики» Азербайджанского НИПНИИ энергетики, Баку.

Мустафаев Рауф Исмаил оглы, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела «Перспективное развитие электроэнергетики» Азербайджанского НИПНИИ энергетики, Баку.

Analysis of Efficiency of Work of Asynchronous Machine with a Shartcircuited Rotor at a Scalar Frequency Control

GASANOVA Lyaman Gasan gyzy (*Azerbaijan Scientific-Research Design Institute of Power Engineering (ASRDIPE), Baku, Azerbaijan*) – Cand. Sci. (Eng.)

MUSTAFAYEV Rauf Ismail ogly (*ASRDIPE, Baku, Azerbaijan*) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

The article presents a procedure for analyzing the performance of a frequency controlled induction machine in the case of using a scalar control algorithm with keeping the power losses in the machine itself to a minimum and maintaining constant overload capacity and magnetic flux. The essence of the proposed procedure consists in combining the calculated values of machine parameters obtained from its mathematical model in the case of using frequency control with the analytical expressions characterizing the power loss components. As a result, it becomes possible to determine not only the total power losses in a frequency controlled induction machine, but also changes in its other operating parameters, the reactive power absorbed from the network being the most important one of them. It has been found that with these parameters, i.e., the total power losses in the machine and the absorbed reactive power duly taken into account, it is most expedient to use a control algorithm maintaining constant overloading capacity and magnetic flux at a constant torque on the machine shaft. With the machine shaft torque being of a windage type as determined from the power losses taken in combination with the absorbed reactive power, the best performance is achieved in using the machine control law maintaining its constant overloading capacity:

$$k_{us} = k_n' k_{fs} \omega_r.$$

Key words: induction machine with a squirrel-cage rotor, mathematical model, driving torque, scalar frequency control, minimum power losses, constant overloading capacity, constant magnetic flux

REFERENCES

1. **Guzeyev B.V., Khakim'yanov M.I.** *Neftegazovoe delo (elektronnyi nauchnyi zhurnal) – in Russ. (Oil and Gas business (electronic scientific magazine), 2011, No. 3, pp. 441–450.*
2. **Mustafayev R.I., Gasanova L.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2009, No. 6, pp. 36–42.*
3. **Mustafayev R.I., Gasanova L.G., Musayev M.M.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering), 2018, No. 5, pp. 38–44.*
4. **Ekanayake J.B., Holdsworth L., Wu X., Jenkins N.** *Dynamic modeling of doubly-fed induction generator wind turbines. – IEEE Trans. Power Syst., 2003, vol. 18, No. 2, pp. 803–809.*
5. **Alghuwainem S.M., Hammouda R.A., Al-Farhan A.R. M.** *Transient analysis of a wind-driven induction generator/in Proc. Canadian Conf. Electrical Computer Engineering, 2001, pp. 13–16.*
6. **Parviainen A., Niemela M., Pyrhonen J.** *Modeling of axial flux permanent-magnet machines. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, vol. 40, No. 5, pp. 1333–1340.*
7. **Giulii Capponi F., De Donato G., Caricchi F.** *Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, vol. 48, No. 6, pp. 2190–2205.*
8. **Kostenko M.P.** *Elektricheskiye mashiny. Spetsial'naya chast' (Electrical machines. Special part). Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1949, 712 p.*
9. **Bulgakov A.A.** *Chastotnoe upravleniye asinkhronnyimi dvigateleyami (Frequency control of induction electromotors). Moscow, Nauka, 1966, 216 p.*
10. **Syromyatnikov I.A.** *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigatelei (Operation modes of induction and synchronous motors), 4th edit. Moscow, Energoatomizdat, 1984, 239 p.*
11. **Rasulov M.M., Mustafayev R.I.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering), 1970, No. 11, pp. 3–5.*
12. **Mustafayev R.I., Gasanova L.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity), 2015, No. 2, pp. 40–48.*
13. **Primeneniye analogovykh vychislitel'nykh mashin v energeticheskikh sistemakh (Application of analog computers in power systems)/Edit. by N.I. Sokolov. Moscow, Energiya, 1964, 408 p.**
14. **Kopylov I.P.** *Matematicheskoe modelirovaniye elektricheskikh mashin (Mathematical modeling of electric machines). Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 327 p.*

[25.07.2018]