

УДК 62.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-2-77-81

Анализ динамических процессов при запуске высокочастотного синхронного магнитоэлектрического двигателя

Л.Н. Понамарева

Представлен анализ динамических процессов запуска высокочастотной синхронной магнитоэлектрической машины, применяемой в современных микротурбинных установках (МТУ) в качестве турбогенераторов. Обозначены основные причины, вызывающие сложность запуска высокочастотных синхронных магнитоэлектрических машин и обуславливающая актуальность поиска специальных средств и алгоритмов запуска. Рассмотрен способ запуска МТУ, при котором синхронная магнитоэлектрическая машина, предназначенная для работы генератором, используется в режиме электродвигателя (МЭД). Описан двухступенчатый комбинированный алгоритм, сочетающий частотное управление по разомкнутой схеме на начальном этапе и векторное управление по замкнутой схеме в дальнейшем. С помощью разработанной имитационной компьютерной модели проанализированы эффективность и надежность процесса запуска. В целом анализ показал, что на этапе частотного управления по разомкнутой схеме необходимо учитывать механическую характеристику воздушных подшипников, применяемых в МТУ, чтобы избежать выпадения МЭД из синхронизма. Также большое влияние на реализацию запуска оказывает момент переключения с разомкнутой схемы на замкнутую. Определены оптимальные пусковые настройки системы управления, при которых соблюдается условие синхронизма, надежный и быстрый разгон.

Ключевые слова: высокочастотный синхронный магнитоэлектрический двигатель, лепестковые газодинамические подшипники, микротурбинные установки, частотное управление, векторное управление, комбинированный алгоритм.

An Analysis of the Dynamic Processes Triggered in Starting a High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Motor

L.N. Ponomareva

The dynamic processes triggered in starting a high-speed permanent-magnet synchronous machine used in modern microturbine units (MTUs) as a turbine generator are analyzed. The main factors causing complexity of starting high-speed permanent-magnet synchronous machines, which generates the need to develop special means and algorithms for starting them, are outlined. The MTU starting method in which the synchronous permanent-magnet machine intended to operate as a generator is used as an electric motor is considered. A two-stage combined algorithm combining open-loop frequency control at the initial stage and closed-loop vector control at the subsequent state is described. A digital simulation model is developed, using which the starting process efficiency and reliability are analyzed. The analysis has shown that, in order to keep the permanent-magnet synchronous motor in synchronism at the stage of its open-loop frequency control, the mechanical characteristic of the air-foil bearings used in the MTUs shall be taken into account. It has also been found that the moment of time at which the control is switched over from the open-loop to the closed-loop arrangement has a significant influence on implementing the startup mode. The control systems optimal startup settings at which the synchronism condition is fulfilled and the reliable and fast startup is ensured are determined.

Key words: high-speed synchronous permanent-magnet electric motor, hydrodynamic fluid film bearings, microturbine units, frequency control, vector control, combined algorithm.

Высокочастотные синхронные магнитоэлектрические машины используются в качестве турбогенераторов микротурбинных установок (МТУ), представляющих собой автономные генерирующие установки мощностью до 400 кВт с частотой вращения, достигающей десятков-сотен тысяч оборотов в минуту [1].

Сложности запуска МТУ связаны с нехваткой давления и наличием повышенного момента сухого трения на малых частотах вращения в лепестковых газодинамических подшипниках (ЛГП), которые применяют в МТУ. Зависимость аэродинамического момента трения M вращающихся частей от частоты вращения ротора n на различных этапах приработки подшипников приведена на рис. 1. Представленный график разделен на три зоны: 1 — зону сухого трения; 2 — зону всплывтия ротора; 3 — зону после всплывтия ротора.

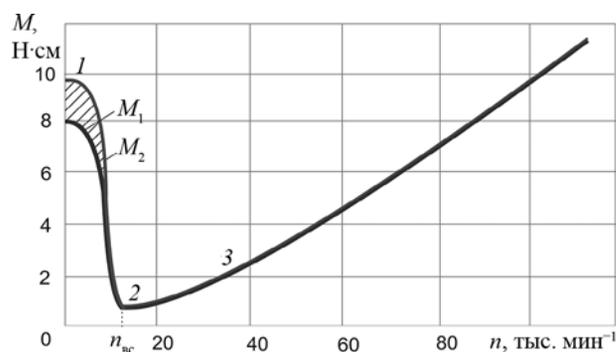


Рис. 1. Зависимость аэродинамического момента трения M вращающихся частей от частоты вращения ротора n на различных этапах приработки подшипников:

M_1 — менее 10 циклов пуск–остановка; M_2 — более 100 циклов пуск–остановка

Одним из способов запуска МТУ является использование синхронной магнитоэлектрической машины, предназначенной для работы генератором, в режиме электродвигателя (МЭД) [2, 3].

Как было показано в публикации [3], для запуска МЭД МТУ наиболее целесообразно использовать комбинированный алгоритм, согласно которому на начальном этапе разгон осуществляют по разомкнутой схеме, а в дальнейшем — с использованием векторного управления.

Процесс запуска начинают с того, что осуществляют так называемую развертку частоты коммутации силовых ключей преобразователя во времени, т. е. плавное ее повышение до заданного значения. Затем система управления запуском переводит двигатель в режим векторного управления (ВУ). ВУ реализуется по сигналам жесткой обратной связи (ЖОС), поступающим от программного датчика положения ротора (ДПР), в котором положение ротора определяется расчетным путем на основании измерения только электрических величин и параметров электрической машины.

С целью получения рекомендаций для осуществления быстрого и достаточно надежного разгона МТУ в два этапа было необходимо проанализировать динамические процессы на каждом этапе, а также определить оптимальную точку и допустимый диапазон времени перехода от первого режима запуска ко второму.

Анализ проведен с помощью компьютерных моделей, созданных в среде MatLab для экспериментального образца-прототипа МТУ с выходной мощностью 1 кВт и номинальной частотой вращения 100 000 мин⁻¹, разработанного на кафедре ЭКАО и ЭТ НИУ «МЭИ».

Первый этап — частотное управление

Одним из важнейших требований к МТУ является минимальное время запуска энергоагрегата. В отличие от ВУ, при котором оптимальный темп разгона задается самим ротором по сигналам ЖОС, на этапе частотного управления (ЧУ) требуется определить и поддерживать допустимый темп повышения частоты коммутации ключей электронного преобразователя. Максимально допустимый темп увеличения частоты коммутации определяется моментом инерции вращающихся частей и электромагнитным моментом двигателя, зависящим от потребляемого тока.

Согласно уравнению движения, ускорение ε ротора определяется разностью вращающего момента машины $M_{эм}$ и момента сопротивления M_c :

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_{эм} - M_c), \quad (1)$$

где J — момент инерции вращающихся частей; t — время; ω — частота вращения, с⁻¹.

Так как момент сопротивления на начальном этапе в основном составляет момент сухого трения в ЛПП, значение которого известно из характеристики ЛПП ($M_c \approx M_{лпп}$) [3], и момент инерции вращающихся частей также известен и неизменен, то максимально возможное ускорение ротора определяется максимально возможным значением развиваемого машиной вращающего момента, который ограничен допустимым значением тока [4, 5]:

$$M_{эм} = \Psi(I_a \sin\theta + I_b \sin(\theta + 120^\circ) + I_c \sin(\theta - 120^\circ)). \quad (2)$$

На рис. 2 приведены полученные на модели осциллограммы частотного запуска двигателя по разомкну-

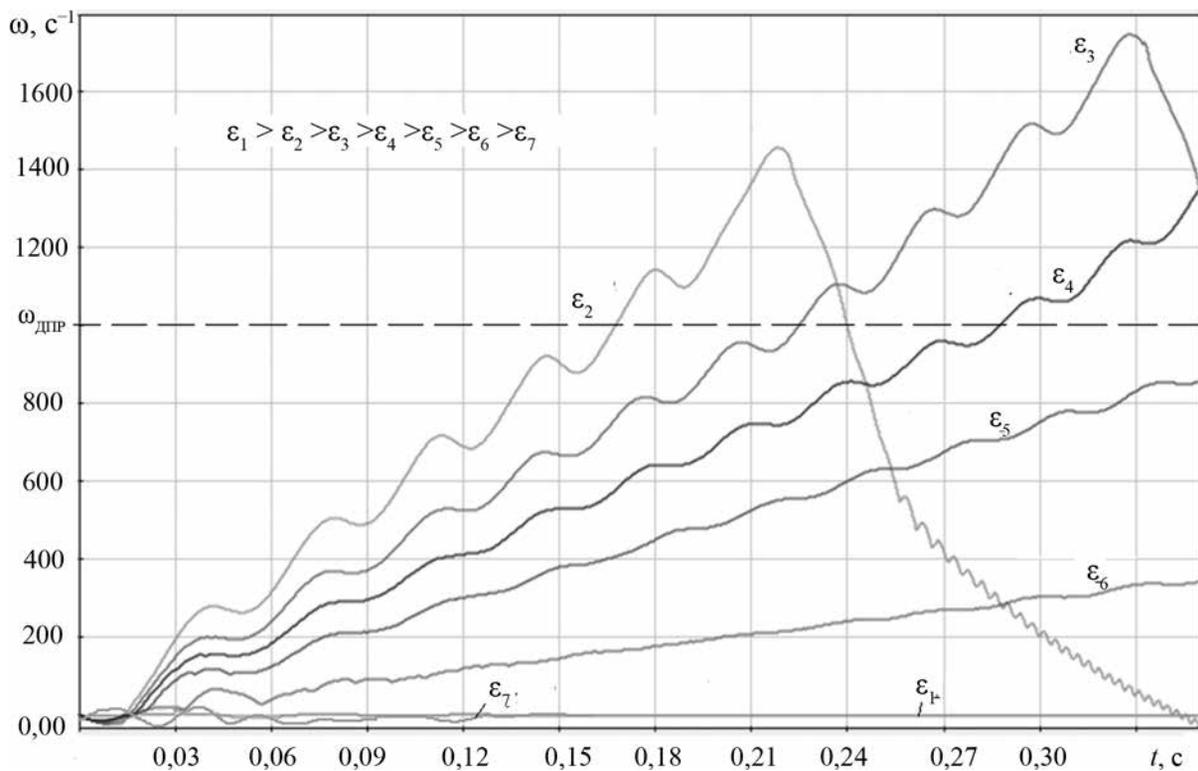


Рис. 2. Частота вращения при различных ε ($\omega_{ДПР}$ — частота, при которой появляется сигнал от ДПР)

той схеме при различных темпах изменения частоты коммутации ключей силового инвертора и при условии непревышения максимального тока.

При задании чрезмерно высокого темпа нарастания частоты коммутации (значение ускорения ϵ_1) ротор не успевает за этим темпом, не втягивается в синхронизм и остается неподвижным. При задании значения ускорения на уровне ϵ_2 интенсивность разгона ротора самая высокая. Однако по мере вращения ротора увеличиваются его качания и через доли секунды ротор выпадает из синхронизма. По мере уменьшения задаваемого ускорения от значения ϵ_2 до значения ϵ_6 интенсивность разгона снижается, уменьшаются качания ротора и опасность выпадения его из синхронизма. При медленном темпе изменения частоты коммутации, не превышающем частоту приемистости, двигатель работает в шаговом режиме (осциллограмма, соответствующая ϵ_7). Под действием максимального момента вращения ротор успевает войти в синхронизм, быстро переместиться и остановиться в новом положении, ожидая очередной коммутации. На осциллограмме, соответствующей этому случаю, видны небольшие всплески частоты вращения и снижение ее до нуля.

По мере разгона момент сопротивления ЛПП, согласно нагрузочной характеристике (см. рис. 1), уменьшается. Поэтому следует снижать темп нарастания частоты коммутации, иначе ротор все равно выпадает из синхронизма.

Главной задачей является выбор такого ускорения, при котором ротор не выпадает из синхронизма до всплывания на ЛПП.

Второй этап – векторное управление

Анализ динамики запуска МТУ на этапе ВУ оценивался в зависимости от этапа приработки газодинамических подшипников. На рис. 1 приведены зависимости момента сопротивления подшипников от частоты вращения ротора на разных этапах приработки: начальный этап (менее 10 циклов пуск–остановка) и после длительной приработки (более 100 циклов пуск–остановка). После длительной приработки момент сопротивления увеличивается, особенно на участке сухого трения.

Одновременно исследовалось влияние на процесс запуска момента перехода с ЧУ (разомкнутая схема) на ВУ (замкнутая схема). Рассмотрены три случая: переход в зоне 1 сухого трения, в зоне 2 всплывания ротора и в зоне 3 после всплывания ротора (см. рис. 1).

При исследовании процесса запуска с помощью компьютерной модели было принято допущение, что во всех рассматриваемых зонах значение ЭДС обмотки якоря достаточно для корректного вычисления положения ротора программным ДПР, т. е. оно достигает уровня, соответствующего 10 % от уровня при номинальной частоте вращения ($\omega_{\text{ДПР}}$ на рис. 2). К сожалению,

программные ДПР являются динамическими, т. е. не обеспечивают получение качественного сигнала ОС при малых частотах вращения и при неподвижном роторе. Поэтому справедливость принятого допущения следует дополнительно проверить после выбора точки перехода от первого этапа запуска ко второму.

В результате проведенного анализа результатов исследования модели установлено, что во всех рассмотренных зонах переход с разомкнутой системы управления на замкнутую систему происходит плавно, наблюдается устойчивый разгон ротора и дальнейший переход в установившийся режим стабилизации частоты вращения. Проанализирован также случай выпадения ротора из синхронизма на этапе разгона по разомкнутой схеме (рис. 3), а также процесс втягивания его в синхронизм при последующем переключении на ВУ.

Результаты исследования модели конкретного варианта МТУ (упомянутого выше макетного образца) показали следующее:

- выпадение ротора из синхронизма происходит на доли секунды позже всплывания ротора, т. е. уже в зоне третьей характеристики ЛПП;
- после выпадения ротор способен втянуться в синхронизм, если переключение с ЧУ на ВУ осуществлять мгновенно либо с небольшой задержкой, не превышающей 0,1 с. Если задержка переключения превысит допустимое значение, определяемое моментом инерции ротора, то ротор не успеет втянуться в синхронизм и осуществление дальнейшего разгона станет невозможным.

На рис. 3 приведена осциллограмма частоты вращения ротора при использовании неприработанных подшипников (характеристика M_1 на рис. 1) при запуске по комбинированному алгоритму.

На этапе ЧУ при резком уменьшении момента трения наблюдается изменение ускорения и амплитуды колебаний частоты вращения (зоны 1, 2 и 3). В момент времени t_4 (зона 3) происходит выпадение ротора из синхронизма. Включение ВУ осуществляется через доли секунды (момент времени t_5). Как видно из рис. 3, система управления срабатывает таким образом, что ротор возвращается в синхронизм в момент времени t_5 , после чего осуществляется дальнейший устойчивый разгон по замкнутой схеме с оптимальным, более высоким ускорением, чем на этапе ЧУ по разомкнутой схеме.

В случае переключения с разомкнутой схемы на замкнутую в момент, когда уровень ЭДС еще недостаточен для работы программного ДПР (т. е. когда несправедливо принято выше допущение), система управления не сможет корректно определить положение ротора в пространстве и обеспечить соответствующее переключение ключей инвертора, чтобы осуществить разгон ротора по замкнутой схеме ВУ.

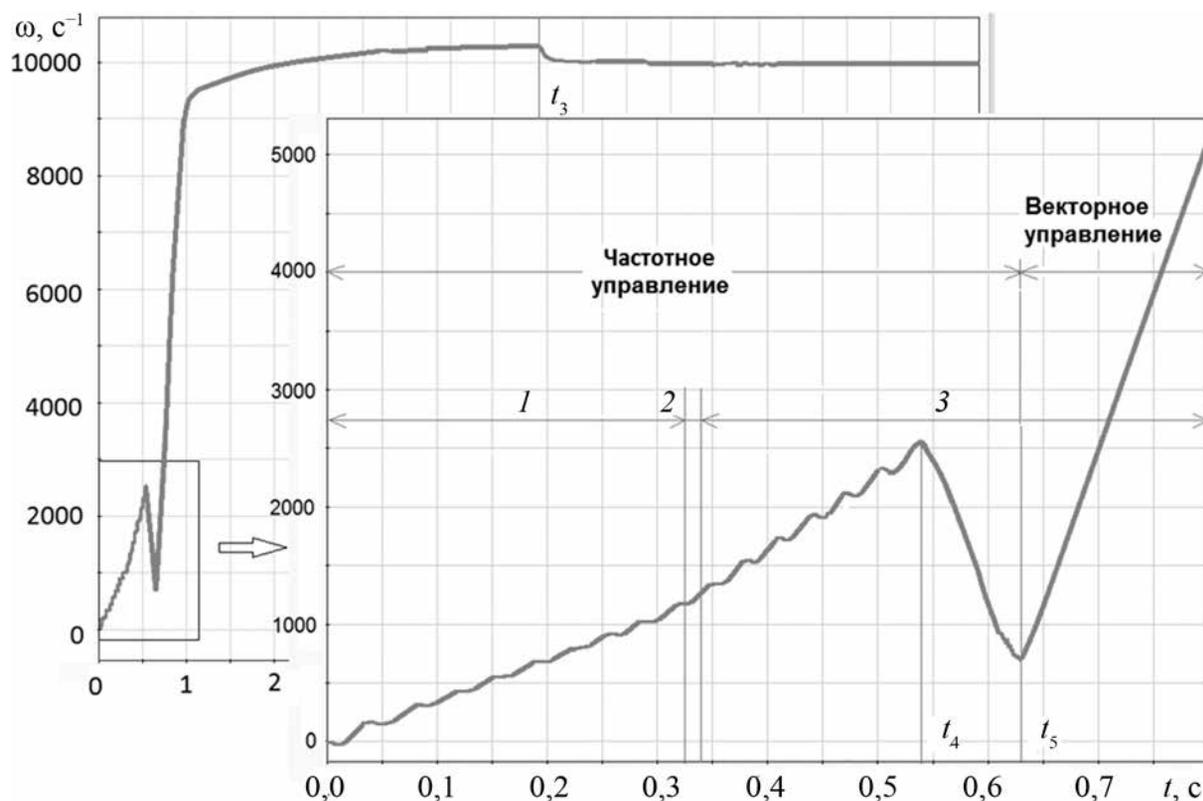


Рис. 3. Изменение частоты вращения ротора при двухэтапном запуске

Если учесть, что всплытие ротора происходит раньше выпадения его из синхронизма, а также то, что с момента всплытия ротора ЭДС становится достаточной для работы программного ДПР, то можно заключить, что переход с разомкнутой схемы запуска на замкнутую целесообразно осуществлять сразу после всплытия ротора.

Приведем выводы.

При выборе оптимального темпа повышения частоты на этапе частотного управления по разомкнутой схеме необходимо учитывать резкое снижение момента сопротивления при всплытии ротора, чтобы избежать выпадения МЭД из синхронизма.

Точка выпадения ротора из синхронизма на этапе частотного управления по разомкнутой схеме лежит на доли секунды позже точки всплытия ротора.

Переключение с частотного на векторное управление целесообразно осуществлять сразу после всплытия ротора, не дожидаясь выпадения его из синхронизма.

Литература

1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций. СПб.: КОРОНА-Век, 2006.
2. Понамарева Л.Н., Румянцев М.Ю., Сизякин А.В. Алгоритмы управления высокоскоростными электро-

турбомашинами в режиме запуска // Новое в российской электроэнергетике. М.: Информационное агентство «Энергопресс». 2016. № 5. С. 18—35.

3. Понамарева Л.Н., Нагайцев В.И., Румянцев М.Ю. Анализ влияния параметров высокочастотного синхронного магнитоэлектрического двигателя на его свойства при частотном запуске // Новое в российской электроэнергетике. М.: Информационное агентство «Энергопресс» 2016. № 9. С. 41—50.

4. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. М.-Л.: Энергия, 1964.

5. Прозоров В.А., Рогачевский В.С. Частотный пуск синхронных магнитоэлектрических двигателей при ограничении величины тока // Электричество. 1971. № 2.

References

1. Ovchinnikov I.E. Ventil'nye Elektricheskie Dvigateli i Privod na ikh Osnove (Malaya i Srednyaya Moshchnost'): Kurs Lektsiy. SPb.: KORONA-Vek, 2006. (in Russian).
2. Ponomareva L.N., Rumyantsev M.Yu., Sizyakin A.V. Algoritmy Upravleniya Vysokoskorostnymi Elektro-Turbomashinami v Rezhime Zapuska // Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike. M.: Informatsionnoe Agentstvo «EnergoPress». 2016;5:18—35. (in Russian).

3. **Ponamareva L.N., Nagaytsev V.I., Rumyantsev M.Yu.** Analiz Vliyaniya Parametrov Vysokochastotnogo Sinkhronnogo Magnitoelektricheskogo Dvigatelya na ego Svoystva pri Chastotnom Zapuske // *Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike*. M.: Informatsionnoe Agentstvo «Energopress» 2016;9:41—50. (in Russian).

4. **Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N.** Elektricheskie Mashiny s Postoyannymi Magnitami. M.-L.: Energiya, 1964. (in Russian).

5. **Prozorov V.A., Rogachevskiy V.S.** Chastotnyy Pusk Sinkhronnykh Magnitoelektricheskikh Dvigatelyey pri Ogranichenii Velichiny Toka // *Elektrichestvo*. 1971;2. (in Russian).

Сведения об авторе

Понамарева Лариса Николаевна — инженер кафедры электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта НИУ «МЭИ», e-mail: ponamareva@list.ru

Information about author

Ponamareva Larisa N. — Engineer of Electrical Complexes of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., NRU MPEI, e-mail: ponamareva@list.ru

Статья поступила в редакцию 18.10.2016