

Колебания частоты вращения электрических машин в системах с преобразователями частоты и алгоритмы подавления колебаний

А. Г. Воронцов^{1✉}, М. В. Пронин¹, Г. Г. Розбицкий²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉ ag.voroncov@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены электромеханические процессы в системах с преобразователями частоты и электрическими машинами, которым присущи колебания частот вращения машин, токов и напряжений. В приводах с выпрямителями, конденсаторными фильтрами, транзисторными инверторами и асинхронными двигателями в некоторых случаях возникают колебания напряжений фильтров и частот вращения двигателей, приводящие к аварийному отключению. В системах с тиристорными преобразователями частоты со звеном постоянного тока и синхронными машинами при пуске машин в зонах искусственной коммутации возникают колебания частот вращения и токов, которые также могут привести к аварийному отключению. Предложен алгоритм управления, основанный на использовании колебаний постоянных напряжений конденсаторов в транзисторных приводах или напряжений возбуждения синхронных машин и воздействии этих колебаний на частоту импульсов управления инверторов.

Ключевые слова: турбогенератор, асинхронный двигатель, тиристорный преобразователь частоты со звеном постоянного тока, транзисторный преобразователь частоты с диодным выпрямителем, импульсы управления, система управления, напряжение возбуждения, выпрямленное напряжение

Для цитирования: Воронцов А. Г., Пронин М. В., Розбицкий Г. Г. Колебания частоты вращения электрических машин в системах с преобразователями частоты и алгоритмы подавления колебаний // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 9. С. 53–60. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-53-60.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Frequency Fluctuations of Electric Machines in Systems with Frequency Converters and Fluctuation Suppression Algorithms

A. G. Vorontsov^{1✉}, M. V. Pronin¹, G. G. Rozbitskiy²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² ITMO University, Saint Petersburg, Russia

✉ ag.voroncov@gmail.com

Abstract. Electromechanical processes in systems with frequency converters and electric machines, which are characterized by fluctuations in machine speeds, currents and voltages, are considered. In drives with rectifiers, capacitor filters, transistor inverters and asynchronous motors in some cases there are fluctuations of filter voltages and motor speeds, leading to emergency shutdown. In systems with thyristor frequency inverters with a DC link and synchronous machines at the start-up of machines in the zones of artificial commutation there are fluctu-

ations of rotation frequencies and currents, which can also lead to emergency shutdown. A control algorithm based on the use of oscillations of constant capacitor voltages in transistor drives or excitation voltages of synchronous machines and the effect of these oscillations on the frequency of inverter control pulses is proposed.

Keywords: turbogenerator, induction motor, thyristor frequency converter with DC link, transistor frequency converter with diode rectifier, control pulses, control system, excitation voltage, rectified voltage

For citation: Vorontsov A. G., Pronin M. V., Rozbitskiy G. G. Frequency Fluctuations of Electric Machines in Systems with Frequency Converters and Fluctuation Suppression Algorithms // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 9. P. 53–60. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-9-53-60.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В 1999 г. при испытаниях электропривода насоса на стендах ЦНИИ СЭТ возникла задача обеспечения работоспособности установки. В состав привода входил асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (АД) и транзисторный преобразователь частоты (ПЧ) с автономным инвертором напряжения (АИН) и диодным выпрямителем (ТПЧ-250-380). Часть испытаний проводилась на холостом ходу. При разгоне АД от ПЧ диодный выпрямитель обеспечивал АИН и АД энергией, и частота вращения ротора увеличивалась до заданного уровня. По окончании разгона АД диодный выпрямитель переходил в режим холостого хода, а в цепи выпрямленного напряжения ПЧ и в частоте вращения ротора АД возникали расходящиеся колебания, что приводило к аварийному отключению привода. Для обеспечения работоспособности системы разработан алгоритм выделения из выпрямленного напряжения переменной составляющей с последующим ее использованием для коррекции частоты следования импульсов управления (ИУ) транзисторами АИН. Реализация алгоритма позволила обеспечить работоспособность привода [1]–[3].

В дальнейшем в АО «Силовые машины» выполнялись поставки электроприводов и систем с тиристорными пусковыми устройствами (ПУ), базирующиеся на разработках собственных специалистов [1]–[3] и специалистов других предприятий [4]. Поставлялись системы пуска турбогенераторов в парогазовых установках [5], приводы рудоразмельных мельниц [6], системы пуска асинхронизированных компенсаторов [7]–[9]. В этих установках использовались ПУ со звеном постоянного тока, в состав которых входили зависимые инверторы тока (ЗИТ). При работе этих устройств в зоне искусственной коммутации в ЗИТ также возникали колебания частоты вращения электрических машин. Оказалось, что алгоритм подавления нежелательных колебаний, разработанный для АД, пригоден и для машин переменного тока других типов с тиристорными ПУ.

В статье описан указанный алгоритм и особенности его использования в различных системах.

Алгоритм стабилизации режимов работы привода насоса. Схема привода насоса представлена на рис. 1. В соответствии со схемой ПЧ содержит диодный выпрямитель (ДВ), звено постоянного тока (ЗПТ) с индуктивностью L_d , звено постоянного напряжения (ЗПН) с емкостью C , АИН, АД и систему управления (СУ). Питание ПЧ осуществляется от трехфазной электросети, представленной источниками ЭДС e_s , индуктивностью L_s и с напряжением u_s 380 В, частотой 50 Гц. АД имеет мощность 250 кВт, напряжение 380 В и частоту в номинальном режиме 50 Гц. СУ обеспечивает регулирование АД в диапазоне изменения частоты вращения от нулевой до номинальной при вентиляторной характеристике нагрузки. На входе АИН защитная цепь с чоппером и резистором не использовалась.

При испытаниях привода насоса на стендах ЦНИИ СЭТ в режимах работы АД без нагрузки на валу разгон ротора машины осуществлялся, как представлено на диаграмме рис. 2. В начале процесса разгона ротора выпрямленное напряжение и ток ПЧ u_d и i_d имели сравнительно небольшие пульсации, через ДВ энергия передавалась в АИН и АД, а частота вращения ротора n возрастала до заданного значения. При переходе в установившийся режим работы привода потребление энергии из сети уменьшалось, выпрямленный ток ДВ периодически прерывался, возникали колебания напряжения в ЗПН, которым соответствовали колебания электромагнитного момента M_e , токов двигателя i_{ad} и частоты вращения ротора АД. Со временем размах колебаний возрастал, что приводило к аварийному отключению привода.

Алгоритм стабилизации режима работы привода разработан на основе известных механических характеристик АД, представленных на

рис. 3. На рисунке взаимная зависимость электромагнитного момента машины M и частоты вращения отображена для двигательного режима работы АД (1-й квадрант) и генераторного режима (2-й квадрант). Пересечение механической характеристики с осью ординат считается синхронной частотой вращения n_0 , при которой частота тока статора соответствует частоте вращения ротора при нулевой активной мощности АИН. Если при той же частоте вращения ротора частота напряжения и тока статора увеличиваются, то синхронная частота n_0 перемещается в точку n_{01} при соответствующем изменении всей характеристики. При этом электромагнитный момент увеличивается, и активная мощность передается от АИН к АД. Если частота напряжения и тока статора уменьшаются, то синхронная частота перемещается в точку n_{02} при соответствующем изменении всей характеристики. При этом электромагнитный момент становится отрицательным, и активная мощность передается от АД к АИН. Управлять направлением передачи активной мощности через АИН, а также запасом энергии и напряжением емкости C можно, используя пульсации напряжения в ЗПН.

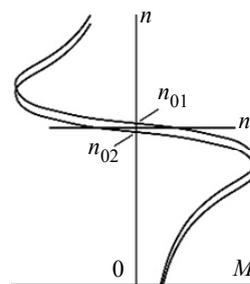


Рис. 3. Механические характеристики АД
Fig. 3. Mechanical characteristics of IM

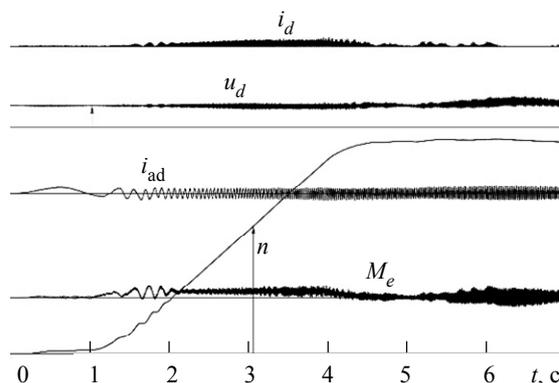


Рис. 4. Пуск АД от ПЧ с использованием алгоритма стабилизации процесса
Fig. 4. Starting an IM from a frequency converter with using the process stabilization algorithm

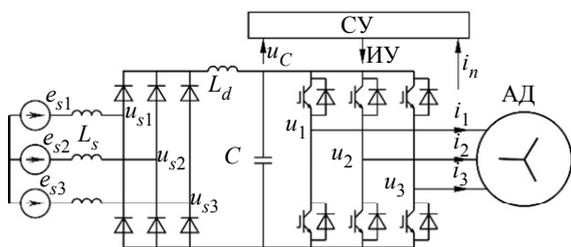


Рис. 1. Схема привода насоса с АД и транзисторным ПЧ
Fig. 1. Schematic diagram of pump IM and transistorized frequency converter

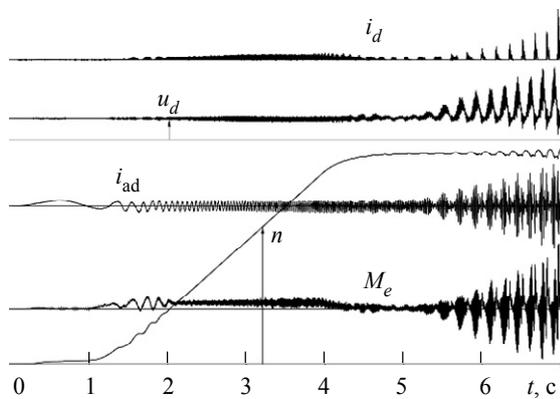


Рис. 2. Пуск АД от ПЧ без использования алгоритма стабилизации процесса
Fig. 2. Starting an IM from a frequency converter without using the process stabilization algorithm

В соответствии с указанной идеей осуществляется фильтрация напряжения емкости C

$$u_{Cf,t+\Delta t} = (u_C - u_{Cf,t})\Delta t / T_{uC}, \quad (1)$$

где $u_{Cf,t}$ – отфильтрованное напряжение ЗПН; u_C – измеренное напряжение ЗПН; T_{uC} – постоянная времени фильтра; Δt – время цикла работы СУ; t – текущий момент времени.

Далее вычисляется коэффициент изменения напряжения

$$K_u = 1 + K_y (u_C / u_{Cf,t} - 1), \quad (2)$$

где K_y – коэффициент влияния обратной связи по напряжению.

Заданная фаза системы напряжений управления АИН (основных гармонических составляющих вектора напряжений обмотки статора АД)

$$\tau_{y,t+\Delta t} = \tau_{y,t} + K_u \omega_3 \Delta t, \quad (3)$$

где ω_3 – частота вектора напряжений управления АИН, сформированная в СУ.

Результаты расчета пуска двигателя при наличии обратной связи по напряжению ПЧ (1)–(3) представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что

замыкается на разрядное сопротивление R_p коммутационным аппаратом Q_5 .

Далее в ТИ открываются два плеча инвертора и создается контур для протекания тока через две фазы СГ, как указано на рис. 6. Нарастание тока в этом контуре обеспечивается тиристорным выпрямителем ПЧ. Через заданное время выпрямитель переводится в инверторный режим, токи во всех элементах гаснут, тиристоры запираются. В процессе нарастания тока в фазах нарастает основной магнитный поток СГ и наводит в обмотке возбуждения ЭДС, зависящую от углового положения ротора. Под действием этой ЭДС в цепи возбуждения и в сопротивлении R_p создается ток. Падение напряжения на R_p запоминается в виде действующего значения U_{f1} . По окончании этой процедуры выдерживается бестоковая пауза и подается импульс тока в другую пару фаз СГ. Этот импульс создает в СГ магнитный поток, сдвинутый по фазе на угол $\pi/3$ относительно первого случая. На R_p создается напряжения U_{f2} . При дальнейшей подаче в фазы импульсов тока падения напряжения на R_p распределяются по кривой, в которой основная составляющая синусоидальна (рис. 6).

Полученной зависимости соответствует следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} U_{f1} &= U_{fm} \cos(\tau_1); \\ U_{f2} &= U_{fm} \cos(\tau_1 + \pi/3), \end{aligned} \quad (4)$$

где U_{fm} , τ_1 – амплитуда и фаза синусоидальной составляющей кривой напряжения.

При решении системы уравнений (4) вычисляется параметр τ_1 , который определяет положение оси d относительно оси l фазы статора СГ (на практике используется большее количество измерений).

После ОПР включается в работу СВ и осуществляется форсированное возбуждение СГ с последующей стабилизацией тока возбуждения на уровне тока холостого хода. Затем включается ПЧ и в режиме искусственной коммутации при ограничении выпрямленного тока осуществляется разгон СГ.

Для наглядного анализа процесса пуска СГ построены математические и компьютерные модели систем [1]–[3] и выполнены расчеты при следующих параметрах оборудования: активная мощность СГ – 76 МВт; напряжение – 11 кВ; частота – 50 Гц; коэффициент мощности – 0.95; КПД – 0.986; момент инерции с учетом турбины – 5100 кг · м²; ток возбуждения – 840 А; напряжение возбуждения – 125 В; ток возбуждения холостого хода – 580 А. Индуктивности СГ: рассеяние обмотки статора – 0.1 о. е.; взаимные индуктивности по осям d и q – 0.93 о. е. и 0.53 о. е.; индуктивность рассеяния обмотки возбуждения – 0.2 о. е.; индуктивности рассеяния демпферных обмоток по осям d и q – 0.165 о. е. и 0.125 о. е. Активные сопротивления СГ: сопротивление фазы статора – 0.0023 о. е., демпферных контуров по осям d и q – 0.013 о. е. и 0.011 о. е. Тиристорное ПУ со звеном постоянного тока в номинальном режиме имеет мощность 6 МВт, напряжение – 6 кВ, частоту – 50 Гц, токи фаз выпрямителя и инвертора – 800 А, выпрямленный

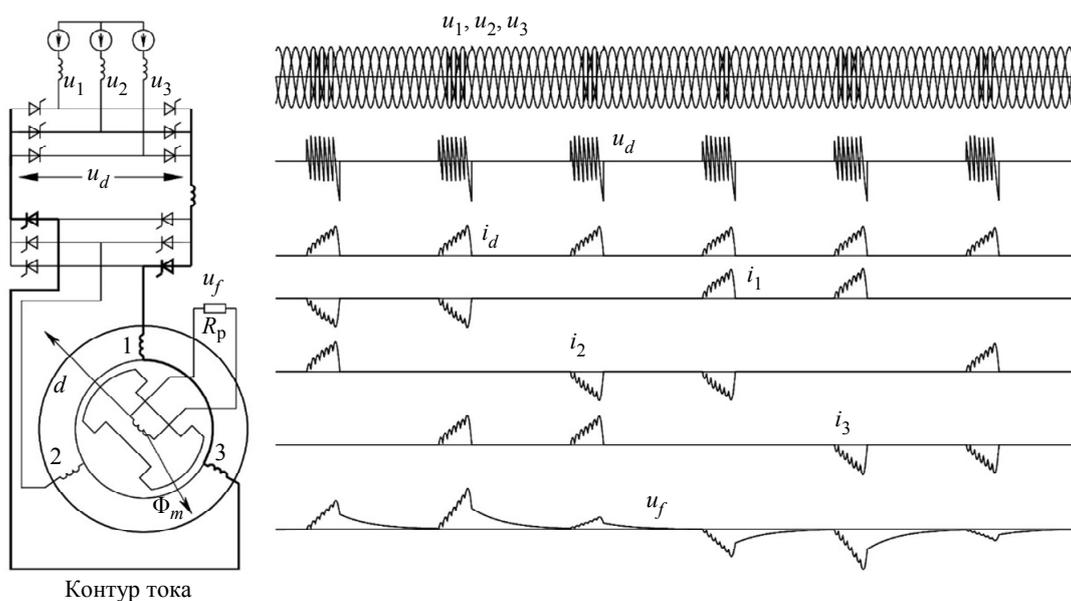


Рис. 6. Схема определения положения ротора
Fig. 6. Scheme of rotor position determination

ток – 1000 А, индуктивность сглаживающего реактора – 20 мГн. В инверторе угол инвертирования при искусственной коммутации задается равным нулю, при естественной коммутации вычисляется.

На рис. 7 представлен результат расчета пуска СГ. Изображен фрагмент процесса от момента времени от 3.5 до 12.5 с. Ток возбуждения СГ задан на уровне тока холостого хода, выпрямленный ток ПЧ – 1000 А. Переход от искусственной коммутации к естественной задан на частоте вращения СГ 5 % номинального значения. На рис. 7 не отражена процедура ОНР и форсированного начального возбуждения СГ напряжением U_{fm} , при котором ток возбуждения нарастает до заданного ко времени 3.8 с. В момент 5 с включился в работу ПЧ. При достаточно точном ОНР электромагнитный момент СГ увеличивается до максимально возможного и быстро растет частота вращения ротора n . Далее в режиме искусственной коммутации переключаются тиристоры ЗИТ с помощью выпрямителя и изменяются электромагнитный момент и частота вращения ротора. Задано линейное увеличение во времени частоты переключения тиристоров ЗИТ. Частота вращения ротора постепенно возрастает, но неравномерно. Возникает опасность отрицательного направления вращения ротора в моменты времени около 6.5 с. Низкочастотные колебания существуют в электромагнитном моменте СГ, в токах фаз, в напряжении возбуждения. В момент времени 10.7 с система переходит в режим естественной коммутации тока в ЗИТ за счет ЭДС СГ и нежелательные колебания значений переменных исчезают.

Нежелательные колебания частоты вращения СГ, токов и напряжений можно уменьшить или устранить, если в СУ реализовать алгоритм корректировки частоты следования импульсов управления (ИУ) тиристорами ЗИТ, аналогичный описанному для транзисторного привода. Но в данном случае удобнее измерять и обрабатывать напряжение возбуждения СГ u_f .

В соответствии с указанной идеей осуществляется фильтрация напряжения возбуждения СГ

$$u_{ff,t+\Delta t} = (u_f - u_{ff,t}) \Delta t / T_f, \quad (5)$$

где $u_{ff,t}$ – отфильтрованное напряжение возбуждения; T_f – постоянная времени фильтра.

Далее вычисляется коэффициент изменения напряжения возбуждения

$$K_u = 1 + K_y (u_f / u_{ff,t} - 1), \quad (6)$$

где K_y – коэффициент влияния обратной связи по напряжению возбуждения СГ.

Заданная фаза системы напряжений управления ЗИТ (основных гармонических составляющих) определяется выражение (3).

Результат расчета пуска СГ, аналогичный рис. 7, но выполненный при использовании алгоритма корректировки ИУ ЗИТ по формулам (5), (6) и (3), представлен на рис. 8, где отображен фрагмент процесса от момента времени 3.5 с до момента 12.5 с.

Для обеспечения надежной работы СУ увеличена задержка включения ПУ от 5 с (рис. 7) до 8 с (рис. 8). К моменту 8 с процесс нарастания магнитного потока в СГ затухает и из напряжения возбуж-

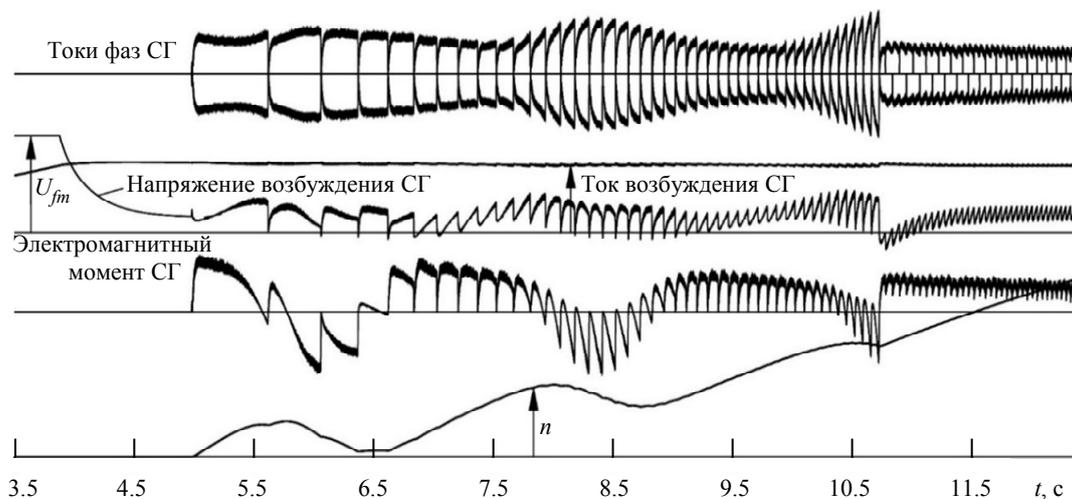


Рис. 7. Фрагмент процесса пуска СГ без коррекции частоты следования ИУ ЗИТ (возбуждение СГ, зона искусственной коммутации ПЧ, переход к естественной коммутации)

Fig. 7. Fragment of SG start-up process without frequency correction of control pulses (SG excitation, zone of artificial switching, transition to natural switching)

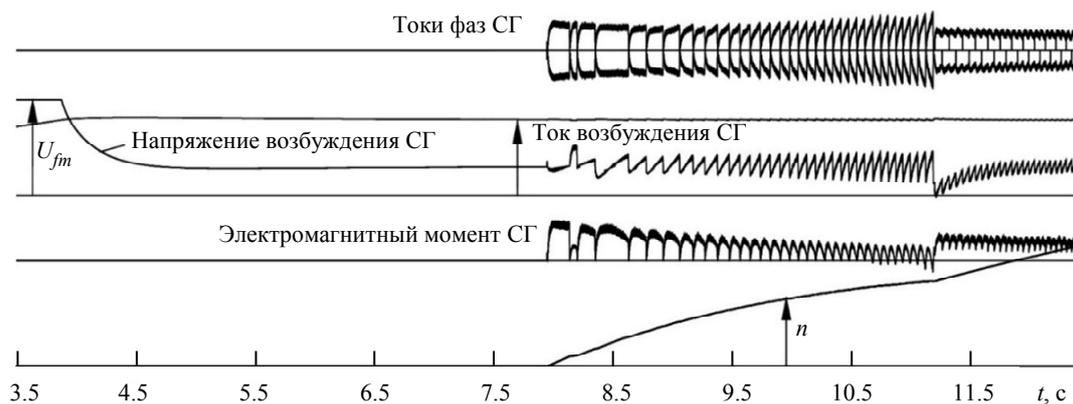


Рис. 8. Фрагмент процесса пуска СГ при коррекции частоты следования ИУ ЗИТ (возбуждение СГ, зона искусственной коммутации ПЧ, переход к естественной коммутации)

Fig. 8. Fragment of SG start-up process with frequency correction of control pulses (SG excitation, zone of artificial switching, transition to natural switching)

дения легче выделяется переменная составляющая, используемая для корректировки частоты ИУ.

Как видно из рис. 8, реализация алгоритма корректировки ИУ позволила устранить нежелательные колебания переменных при пуске СГ и преобразовать изменения переменных в апериодические. В зоне искусственной коммутации ЗИТ разгон СГ осуществляется при меньшей амплитуде токов фаз, а увеличенная задержка включения ПУ не привела к увеличению времени разгона СГ в целом.

Описанный алгоритм корректировки частоты следования ИУ в системах с ПЧ со звеном постоянного тока пригоден для использования в системах пуска турбогенераторов в ПГУ, для пуска мощных синхронных двигателей в приводах мельниц, для пуска асинхронизированных синхронных компенсаторов, для разгона генераторов-двигателей в гидроаккумулирующих электростанциях и др. [3].

Выводы.

1. Если в системе с диодным выпрямителем, транзисторным инвертором напряжения и асинхронным двигателем отсутствуют датчик положе-

ния ротора машины и цепь защиты от недопустимого увеличения выпрямленного напряжения, то при работе системы без нагрузки возможны аварийные колебания частоты вращения, токов и напряжений.

2. Если система с синхронной машиной и тиристорным преобразователем частоты со звеном постоянного тока работает в зоне искусственной коммутации, то возможно возникновение нежелательных колебаний частоты вращения, токов и напряжений, снижающие надежность установки, создающие опасность аварии.

3. Предложен алгоритм корректировки частоты следования импульсов управления полупроводниковыми инверторами в системах по пп. 1 и 2, основанный на том, что в цепях постоянного напряжения (выпрямленное напряжение транзисторных ПЧ или напряжение возбуждения синхронных машин) при возникновении нежелательных колебаний выделяется переменная составляющая, с помощью которой корректируется частота следования импульсов управления полупроводниковыми приборами инверторов.

Список литературы

1. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов. СПб.: «Силовые машины», Электросила, 2004. 252 с.
2. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / под ред. Е. А. Крутякова. СПб.: Электросила, 2003. 171 с.
3. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: изд-во «Ладoga», 2020. 336 с.
4. Виноцкий Ю. Д., Гельфанд Я. С., Сытин А. П. Тиристорные пусковые устройства в электроэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1992. 253 с.
5. Крутяков Е. А., Павлов П. А., Пронин М. В. Алгоритмы работы тиристорных пусковых устройств для турбогенераторов и синхронных двигателей производства АО «Электросила» // Электросила. 2001. № 40. С. 53–59.
6. Электроприводы мельниц ГОК «Олимпиадинский» / Е. А. Крутяков, Р. А. Карзунов, М. В. Пронин, А. Г. Воронцов // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 5. С. 17–20.
7. Thyristor starters for ASK-100 asynchronous compensated compensators / B. Z. Drobkin, M. V. Pronin, E. A. Krutyakov, A. G. Vorontsov // Power Technol. and Engin. 2011. Vol. 44, № 5. P. 411–415.
8. Результаты испытаний асинхронизированных компенсаторов типа АСК-100-4УХЛ4 на ПС 500 кВ Бескудниково / Л. Г. Володарский, И. Я. Довганюк,

Р. Д. Мнев, Т. В. Плотникова, П. В. Сокур, П. Ю. Тузов // Электрические станции. 2013. № 7(984). С. 43–52.

9. Опыт эксплуатации асинхронизированного компенсатора мощностью 100 МВт / Ю. Г. Шакарян,

П. В. Сокур, Т. В. Плотникова, И. Я. Довганюк, Р. Д. Мнев, Н. Д. Пинчук, О. В. Антонюк, М. Б. Ройтгарц, Д. В. Жуков, А. А. Коркунов // Новое в российской электроэнергетике. 2013. № 12. С. 28–36.

Информация об авторах

Воронцов Алексей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: ag.vorontsov@gmail.com

Пронин Михаил Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mvproninn@gmail.com

Розбитский Глеб Геннадьевич – магистрант, Национальный исследовательский университет ИТМО. Кронверкский пр., д. 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия.

E-mail: rozbitsky_gleb@mail.ru

References

1. Jelektroprivody i sistemy s jelektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovateljami (modelirovanie, raschet, primeneniye) / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, P. N. Kalachikov, A. P. Emel'janov / SPb.: «Silovye mashiny», Jelektrosila, 2004. 252 s. (In Russ.).

2. Pronin M. V., Vorontsov A. G. Silovye polnost'ju upravlyаемые poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet) / pod red. E. A. Krutjakova. SPb.: Jelektrosila, 2003. 171 s. (In Russ.).

3. Pronin M. V., Vorontsov A. G. Jelektromehanotronnye komplekсы i ih modelirovanie na JeVM po vzaimosvjazannym podsistemam. SPb.: izd-vo «Ladoga», 2020. 336 s. (In Russ.).

4. Vinickij Ju. D., Gel'fand Ja. S., Sytin A. P. Tiristornye puskovye ustrojstva v jelektrojenergetike // M.: Jenergoatomizdat, 1992. 253 s. (In Russ.).

5. Krutjakov E. A., Pavlov P. A., Pronin M. V. Algoritmy raboty tiristornyh puskovyh ustrojstv dlja turbogeneratorov i sinhronnyh dvigatelej proizvodstva AO «Jelektrosila» // Jelektrosila. 2001. № 40. S. 53–59. (In Russ.).

6. Jelektroprivody mel'nic GOK «Olimpiadinskij» / E. A. Krutjakov, R. A. Karzunov, M. V. Pronin, A. G. Vorontsov // Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. 2005. № 5. S. 17–20. (In Russ.).

7. Thyristor starters for ASK-100 asynchronized compensators / B. Z. Drobkin, M. V. Pronin, E. A. Krutyakov, A. G. Vorontsov // Power Technol. and Engin. 2011. Vol. 44, № 5. P. 411–415.

8. Rezul'taty ispytanij asinhronizirovannyh kompensatorov tipa ASK-100-4UHL4 na PS 500 kV Beskudnikovo / L. G. Volodarskij, I. Ja. Dovganjuk, R. D. Mnev, T. V. Plotnikova, P. V. Sokur, P. Ju. Tuzov // Jelektricheskie stancii. 2013. № 7(984). S. 43–52. (In Russ.).

9. Opyt jekspluatcii asinhronizirovannogo kompensatora moshhnost'ju 100 MVt / Ju. G. Shakarjan, P. V. Sokur, T. V. Plotnikova, I. Ja. Dovganjuk, R. D. Mnev, N. D. Pinchuk, O. V. Antonjuk, M. B. Rojtgarc, D. V. Zhukov, A. A. Korukunov // Novoe v rossijskoj jelektrojenergetike. 2013. № 12. S. 28–36. (In Russ.).

Information about the authors

Aleksey G. Vorontsov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: ag.vorontsov@gmail.com

Mikhail V. Pronin – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mvproninn@gmail.com

Gleb G. Rozbitskiy – master student of ITMO University, Kronverksky Av. 49, Saint Petersburg, 197101, Russia.

E-mail: rozbitsky_gleb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.05.2024; принята к публикации после рецензирования 11.09.2024; опубликована онлайн 25.11.2024.

Submitted 28.05.2024; accepted 11.09.2024; published online 25.11.2024.
