

2. Блюмин, С.Л. Нечеткая логика: алгебраические основы и приложения [Текст] / С.Л. Блюмин [и др.]. – Липецк: ЛЭГИ, 2002. – 111 с.

3. Погодаев, А.К. Адаптация и оптимизация в системах автоматизации и управления [Текст] / А.К. Погодаев, С.Л. Блюмин – Липецк: ЛЭГИ, 2003. – 127 с.

4. Блюмин, С.Л. Экономический факторный анализ [Текст] / С.Л. Блюмин, В.Ф.Суханов, С.В. Чеботарев. – Липецк: ЛЭГИ, 2004. – 148 с.

5. Блюмин, С.Л. Окрестностные системы [Текст] / С.Л. Блюмин, А.М. Шмырин. – Липецк: ЛЭГИ, 2005. – 132 с.

6. Блюмин, С.Л. Дискретное моделирование систем автоматизации и управления [Текст] / С.Л. Блюмин, А.М. Корнеев. – Липецк: ЛЭГИ, 2005. – 124 с.

7. Кудинов, Ю.И. Нечеткая обучаемая система управления технологическим процессом в прокатном производстве [Текст] / Ю.И. Кудинов [и др.]. – Липецк: ЛЭГИ, 2006. – 144 с.

8. Ritt, J. Differential Algebra. [Text] / J. Ritt – NY: AMS, 1950. – 185 p.

9. Carroll, M. The Natural Chain of Binary Arithmetic Operations and Generalized Derivatives [Text] / M. Carroll – ArXiv: math. NO/0112050, 2001. – 17 p.

10. Novotna, J. Orbital Structure of the Derivation on a Certain Semiring of Nonsingular

Complex Matrices [Text] / J. Novotna, J. Chvalina // Acta Univ. M. Belii Math. 2004. № 11. – P. 45-54.

11. Курош, А.Г. Общая алгебра [Текст] / А.Г. Курош. – М.: Наука, 1974. – 160 с.

12. Постников, М.М. Группы и алгебры Ли. [Текст] / М.М. Постников. – М.: Наука, 1982. – 447 с.

13. Laville, G. Analytic Cliffordian Functions [Text] / G. Laville, I. Ramadanoff. – ArXiv: math. CV/0502090, 2005. – 19 p.

14. Блюмин, С.Л. Алгебры с аналитическим аргументом (с нулевым следом таблицы умножения) [Текст] / С.Л. Блюмин // Современные методы теории краевых задач. – Воронеж: ВГУ, 2005. – С. 29-30.

15. Блюмин, С.Л. Основы параметрического комплексного анализа для моделирования процесса прокатки и родственных процессов [Текст] / С.Л. Блюмин // Теория и практика производства листового проката. Ч. 2. – Липецк: ЛГТУ, 2005. – С. 81-87.

Сведения об авторах

Блюмин Семен Львович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики Липецкого государственного технического университета.

E-mail: mailbox@stu.lipetsk.ru

УДК 621.313:519.7

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ГАЗОВЫМИ ТУРБИНАМИ В РАСЧЕТАХ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В.М. Тарасов, О.В. Буланова, А.В. Малафеев

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

В статье рассмотрены вопросы создания математических моделей функционирования синхронных генераторов с газовыми турбинами при возникновении переходных электромеханических процессов. Предложены математические модели синхронного генератора, приводимого газовой турбиной, которые предполагается использовать в программном обеспечении, предназначенном для анализа установившихся и переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, в том числе при выходе промышленных электростанций на раздельную с энергосистемой работу.

Переход России к рыночной экономике привел к значительным изменениям в структуре энергохозяйства страны. Так, крупным

промышленным предприятиям становится выгодным не покупать электроэнергию из энергосистемы, а осуществлять производст-

во собственной. В связи с этим наметилась тенденция расширения существующих и строительства новых промышленных электростанций. Поскольку строительство ТЭЦ требует значительных затрат, то в заводских системах электроснабжения получают распространение более компактные и менее дорогостоящие электростанции, в частности газотурбинные электроустановки (ГТУ).

Внедрение ГТУ требует анализа влияния синхронных генераторов, приводимых газовыми турбинами, на динамическую устойчивость электромеханических переходных процессов систем электроснабжения промышленных предприятий. С этой целью необходимо осуществить математическое моделирование генераторов, входящих в состав ГТУ, с учетом особенностей технологического процесса и действия автоматических регуляторов скорости.

Как известно, динамическая устойчивость переходных процессов синхронных машин определяется изменением угла ротора δ , который, в свою очередь, зависит от небаланса мощностей на валу ротора и, следовательно, турбины.

Для синхронного генератора, первичным двигателем которого является газовая турбина, небаланс мощностей на валу без учета потерь в обмотках машины может быть определен по формуле

$$\Delta P = P_T \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - P_{\text{Пер}} - P_K - P_C - P_{\text{Ac}} + P_{\text{Газ}} + P_{\text{Пер}}, \quad (1)$$

где P_T – механическая мощность турбины; ω – текущая скорость вращения вала турбины; ω_0 – номинальная скорость вращения вала; $P_{\text{Пер}}$ – мощность, обусловленная действием регулятора скорости; P_K – мощность, потребляемая компрессором; P_C – синхронная электромагнитная мощность; P_{Ac} – асинхронная электромагнитная мощность; $P_{\text{Газ}}$ – мощность, обусловленная действием газовых объемов в камере сгорания и между камерой и турбиной; $P_{\text{Пер}}$ – знакопе-

ременная мощность [1].

В переходном процессе, особенно при выходе на отдельную с энергосистемой работу, изменение углов роторов синхронных генераторов, возникающее вследствие небаланса мощностей на валу турбины, приводит к изменению скорости вращения вала компрессора. В настоящее время в ГТУ применяются осевые турбокомпрессоры, мощность которых в зависимости от изменения частоты определяется по формуле

$$P_K = \left[0,13 + 1 - 0,13 \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right]^2 \right] \cdot \left[\frac{\omega}{\omega_0} \right]. \quad (2)$$

Изменение скорости влечет за собой изменение производительности компрессора, подающего нагретый воздух под давлением в камеру сгорания, при пренебрежении изменением температуры и давления согласно следующему соотношению [2]:

$$G_K = G_{K0} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{1,25}, \quad (3)$$

где G_K – расход воздуха через компрессор; G_{K0} – расход воздуха через компрессор при номинальной скорости.

Поскольку весовой расход топлива в ГТУ мал по сравнению с расходом воздуха [3], то им также можно пренебречь. В этом случае расход газа турбиной G_T можно принять приблизительно равным расходу воздуха через компрессор:

$$G_T = G_{T0} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{1,25}, \quad (4)$$

где G_{T0} – расход воздуха через турбину при номинальной скорости.

Тогда мощность нерегулируемой турбины при изменении скорости и неизменных иных параметрах с учетом зависимостей, приведенных в [2]:

$$P_T = P_{T0} \left(\frac{G_T}{G_{T0}} \right) \cdot \left(2 - \frac{\omega}{\omega_0} \right) = P_{T0} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{1,25} \left(2 - \frac{\omega}{\omega_0} \right), \quad (5)$$

где P_{T0} - мощность газовой турбины при номинальной частоте вращения.

Если подставить выражения (2) и (5) в формулу (1), то получим выражение для определения небаланса мощностей на валу нерегулируемой одновальной ГТУ при любом переходном электромеханическом процессе. Мощность, обусловленную действием регулятора скорости P_{Per} , в этом случае необходимо принять равной нулю.

Современные ГТУ обеспечены регуляторами, которые при отклонении скорости вала от номинальной воздействуют на орган, управляющий подачей топлива в камеру сгорания. При наличии таких регуляторов в уравнении (1) мощность турбины P_T может быть принята равной начальному значению установившегося режима, предшествующего переходному, а мощность регулятора представлена зависимостью мощности турбины от скорости с учетом постоянных времени регулятора. Кроме того, необходимо учесть мощность, обусловленную действием газовых объемов $P_{Газ}$, которая в одновальной установке ухудшает процесс регулирования.

Предложенные математические модели синхронного генератора, приводимого газовой турбиной, предполагается использовать в разработанном авторами программном обеспечении, предназначенном для анализа установившихся и переходных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий, в том числе при выходе промышленных электростанций на раздельную с энергосистемой работу. Данный программный комплекс позволит исследовать влияние синхронных генераторов, приводи-

мых газовыми турбинами, как на динамическую устойчивость систем электроснабжения промышленных предприятий в целом, так и на устойчивость синхронной и асинхронной нагрузки в частности. Кроме того, появится возможность прогнозирования возможных эксплуатационных режимов и разработки соответствующих мероприятий, что повысит надежность электроснабжения потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика расчета устойчивости автоматизированных электрических систем [Текст] / Н.Д. Анисимова [и др.]; под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1966. – 248 с.
2. Газотурбинные установки. Конструкции и расчет [Текст]: справочное пособие / Л.В. Арсеньев [и др.]; под ред. Л.В. Арсеньева и В.Г. Тарышкина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 232 с.
3. Кириллов, И.И. Регулирование паровых и газовых турбин [Текст] / И.И. Кириллов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 429 с.

Сведения об авторах

Тарасов Владимир Маркелович, сотрудник кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

E-mail: malapheev_av@mail.ru

Буланова Ольга Викторовна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

E-mail: malapheev_av@mail.ru

Малафеев Алексей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

E-mail: malapheev_av@mail.ru