

УДК 621.311.001.57

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТА МИНИ-ТЭЦ НА БАЗЕ ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вагин Геннадий Яковлевич,

д-р техн. наук, профессор каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: vagin.g.ya@mail.ru

Солнцев Евгений Борисович,

канд. техн. наук, доцент каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: sol10001@mail.ru

Мамонов Андрей Михайлович,

канд. техн. наук, доцент каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: mam800@mail.ru

Петров Антон Александрович,

аспирант каф. «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Института электроэнергетики Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева, Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24. E-mail: petrov85@pisem.net

На протекание переходного процесса в системе электроснабжения с мини-ТЭЦ оказывает влияние большое количество факторов. Разработка математической модели газопоршневого агрегата на базе явнуполюсного синхронного генератора позволит повысить точность расчетов переходных процессов и устойчивости системы, а также позволит выполнять настройку и проверку работы регуляторов напряжения и частоты вращения первичного двигателя.

Цель работы: создание модели газопоршневого агрегата на базе явнуполюсного синхронного генератора, позволяющей рассчитывать и анализировать процессы в электрических сетях 6–10 кВ с мини-ТЭЦ и выполнять настройку регуляторов режима работы станции.

Методы исследования: аналитические методы и вычисление состояния и параметров протекания процессов в среде имитационного моделирования Simulink, входящей в состав программного пакета Matlab.

Результаты. Разработанная модель газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ включает: 1. Систему автоматического регулирования возбуждения генератора, в общем случае позволяющую реализовать ПИД закон регулирования. 2. Первичный двигатель с регулятором частоты вращения. 3. Явнуполюсный синхронный генератор, модель которого учитывает насыщение машины с помощью нормальных частичных характеристик намагничивания, позволяющих правильно учесть потоки рассеяния обмотки возбуждения синхронного генератора при нагрузке. Представленная модель наиболее полно учитывает факторы, оказывающие влияние на протекание режимов работы станции, что приводит к получению более точных результатов. Использование частичных характеристик намагничивания явнуполюсной синхронной машины позволяет учесть изменение параметров схемы замещения генератора при отсутствии достоверных сведений о магнитных свойствах материалов, применяемых при проектировании и изготовлении машины.

Ключевые слова:

Комплексная модель мини-ТЭЦ, явнуполюсный синхронный генератор, газопоршневой агрегат, система возбуждения, частичные характеристики намагничивания, уравнения Парка-Горева, переходные процессы.

Активное развитие малой распределенной энергетики в масштабах страны позволит повысить эффективность использования топлива [1–3] и надежность энергоснабжения [4, 5], снизить ущербы от возможных аварий в энергосистемах и уменьшить общий объем негативного воздействия на окружающую среду [6, 7]. С другой стороны, установка станции в системе электроснабжения сопровождается необходимостью проведения тру-

доемких расчетов, необходимых для оценки ее влияния на параметры системы электроснабжения как в переходных, так и установившихся режимах.

Особенностью мини-ТЭЦ является их низкая устойчивость [4], что связано с малыми моментами инерции вращающихся масс агрегатов. Кроме того, любое короткое замыкание в системе электроснабжения с мини-ТЭЦ является близким [8] для

данного источника энергии, поэтому будет сопровождаться изменением скорости вращения ротора генератора. Ввиду значительной трудоемкости для проведения расчетов переходных и установившихся процессов необходимо применять математическое моделирование с использованием ЭВМ.

Моделирование явнополюсного генератора

Для моделирования синхронных генераторов используется система дифференциальных уравнений Парка–Горева, во взаимной системе относительных единиц имеющая вид [9, 10] (символ «*» опущен):

$$\begin{cases} u_d = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_d - \psi_q (1+s) - R_s i_d; \\ u_q = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_q + \psi_d (1+s) - R_s i_q; \\ u_f = \frac{1}{\omega_c} p\psi_f + R_f i_f; \\ u_{di} = \frac{1}{\omega_c} p\psi_{di} + R_{di} i_{di}, \quad i = 0..n_d; \\ u_{qi} = \frac{1}{\omega_c} p\psi_{qi} + R_{qi} i_{qi}, \quad i = 0..n_q; \\ M_\tau - M_\sigma = \frac{T_J}{\omega_c} p\omega = T_J ps, \end{cases} \quad (1)$$

где n_d, n_q – количество демпферных контуров по соответствующей оси; T_J – инерционная постоянная; s – скольжение ротора генератора относительно синхронно вращающихся осей; M_τ – механический момент на валу генератора, создаваемый первичным двигателем; M_σ – электромагнитный момент сопротивления на валу двигателя.

Пренебрегая влиянием насыщения на сопротивление рассеяния контуров машины [10, 11] потокосцепления генератора можно представить как:

$$\begin{cases} \psi_d = x_\sigma i_d + \psi_{\delta d}; \\ \psi_q = x_\sigma i_q + \psi_{\delta q}; \\ \psi_f = x_{f\sigma} i_f + \psi_{\delta f}; \\ \psi_{di} = x_{di\sigma} i_{di} + \psi_{\delta di}, \quad i = 0..n_d; \\ \psi_{qi} = x_{qi\sigma} i_{qi} + \psi_{\delta qi}, \quad i = 0..n_q. \end{cases} \quad (2)$$

где $x_\sigma, x_{f\sigma}, x_{di\sigma}, x_{qi\sigma}$ – сопротивления рассеяния соответствующего контура; $\psi_{\delta d}, \psi_{\delta q}$ – результирующие потокосцепления воздушного зазора по продольной и поперечной осям:

$$\begin{cases} \psi_{\delta d} = \frac{\psi_d + \frac{\psi_f}{x_{f\sigma}} + \sum_{i=1}^{n_d} \frac{\psi_{di}}{x_{di\sigma}}}{\Gamma_d}; \\ \psi_{\delta q} = \frac{\psi_q + \sum_{i=1}^{n_q} \frac{\psi_{qi}}{x_{qi\sigma}}}{\Gamma_q}. \end{cases} \quad (3)$$

Проводимости машины по продольной и поперечной осям Γ_d, Γ_q можно получить из выражения:

$$\begin{cases} \Gamma_d = \frac{1}{\eta_d x_{ad}} + \frac{1}{x_\sigma} + \frac{1}{x_{f\sigma}} + \sum_{i=1}^{n_d} \frac{1}{x_{di\sigma}}; \\ \Gamma_q = \frac{1}{\eta_q x_{aq}} + \frac{1}{x_\sigma} + \sum_{i=1}^{n_q} \frac{1}{x_{qi\sigma}}, \end{cases}$$

где η_d, η_q – эквивалентные коэффициенты, учитывающие насыщение стали явнополюсной машины вдоль соответствующих осей [12]:

$$\eta_d = \frac{\left[\frac{i_f}{1+k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}} + [1+k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}] + \xi_d \left(i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) - \xi_{dq} \xi_q \frac{x_{dq}}{x_{ad}} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{qi} \right| \right]}{\left(k_2(\Phi_2) + k_r(\Phi_{rd}) \times \operatorname{tg} \alpha_0 \left[\times [1+k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}] \left(i_d + i_f + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) \right] \right)}; \quad (4)$$

где

$$\Phi_2 = [1+k_r(\Phi_{rd})k_{f\sigma}]\Phi_{rd} - \frac{k_{f\sigma}}{\operatorname{tg} \alpha_0} \left[\xi_d x_{ad} \left(i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) - \xi_{dq} \xi_q x_{dq} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{qi} \right| \right]. \quad (5)$$

Коэффициенты $k_r=f(\Phi_{rd}), k_2=f(\Phi_2)$ и $k_{f\sigma}=f(F_{1f})$, определяющие степень насыщения отдельных элементов машины, полученные из нормальных частных характеристик намагничивания [11], представлены на рис. 1, а. Зависимости коэффициентов ξ_d, ξ_q, ξ_{dq} , учитывающих изменение сопротивлений взаимной индукции и влияние токов поперечной оси машины на ее магнитное напряжение по продольной оси, приведены на рис. 1, б.

Блок насыщения математической модели синхронного явнополюсного генератора, реализованный в соответствии с равенствами (4), (5) в операционной среде Simulink [13], приведен на рис. 2. Структурная схема модели генератора, соответствующая выражениям (1)–(3), приводится на рис. 3.

Регулирование возбуждения генератора

Синхронные генераторы, работающие в электроэнергетической системе, оборудованы устройствами автоматического регулирования возбуждения (АРВ) [14], осуществляющими регулирование тока возбуждения по заранее определенному закону [15]. В структуру типового устройства АРВ генератора входят [16]:

- каналы регулирования по отклонению режимных параметров от заданных значений, влияющие на статические и динамические характеристики регулируемой системы;

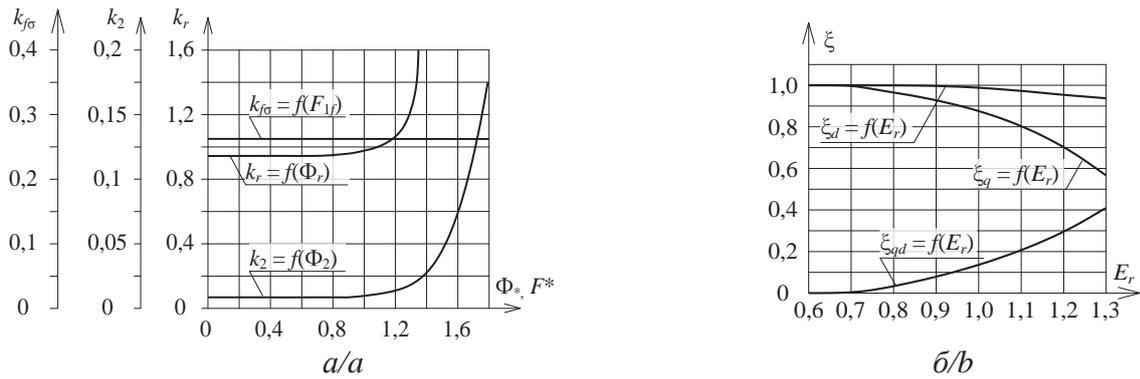


Рис. 1. Зависимости коэффициентов, учитывающих насыщение явнополюсной машины [12]: а) коэффициенты насыщения отдельных элементов генератора; б) коэффициенты изменения сопротивлений взаимоиндукции
Fig. 1. Saturation coefficients functions [12]: a) magnetic saturation coefficients of generator parts; b) mutual induction resistance coefficients

- каналы регулирования по производным режимных параметров, влияющие на динамические характеристики регулируемой системы;
- устройства форсировки, действующей при больших возмущениях в системе и предназначенной для улучшения свойства динамической устойчивости.

Наиболее распространенной системой возбуждения синхронных генераторов мини-ТЭЦ является диодная бесщеточная система. Современные регуляторы возбуждения могут работать в соответствии с ПИД-алгоритмом [17]. Структурная схема системы возбуждения генератора мини-ТЭЦ представлена на рис. 4.

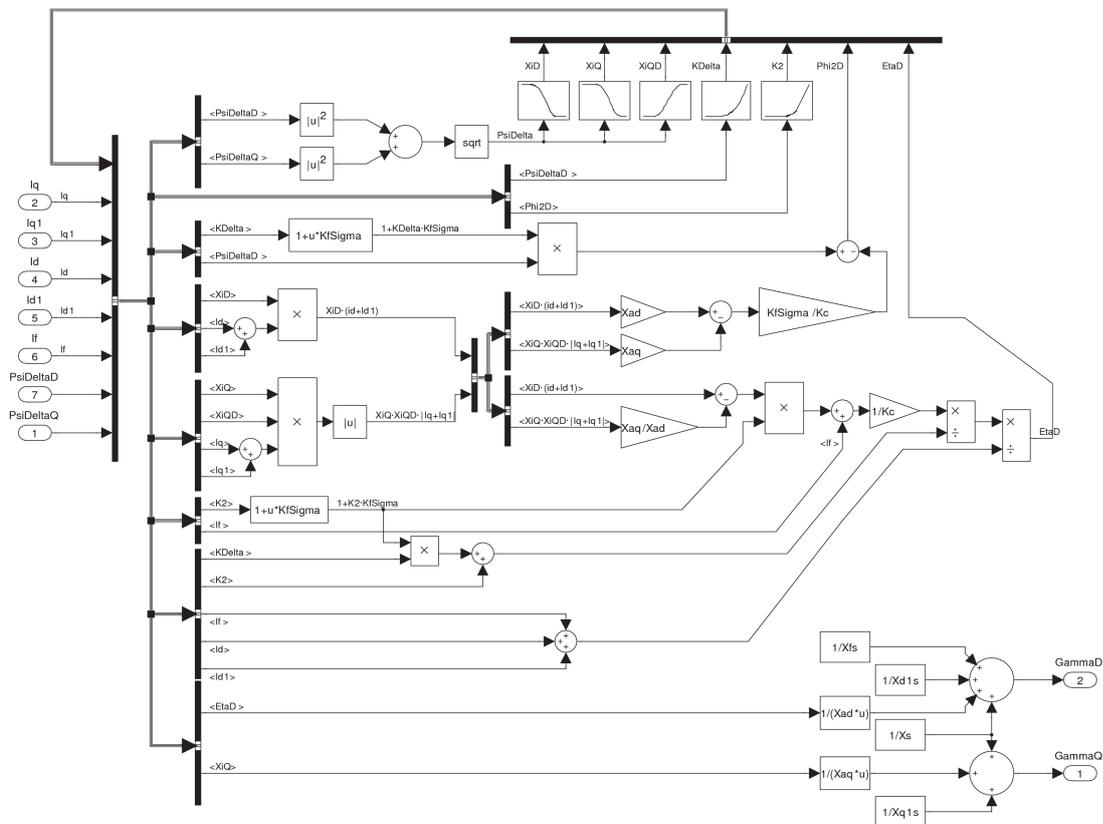


Рис. 2. Математическая модель блока насыщения SaturationBlock синхронного явнополюсного генератора
Fig. 2. Mathematical model of salient-pole synchronous generator saturation block

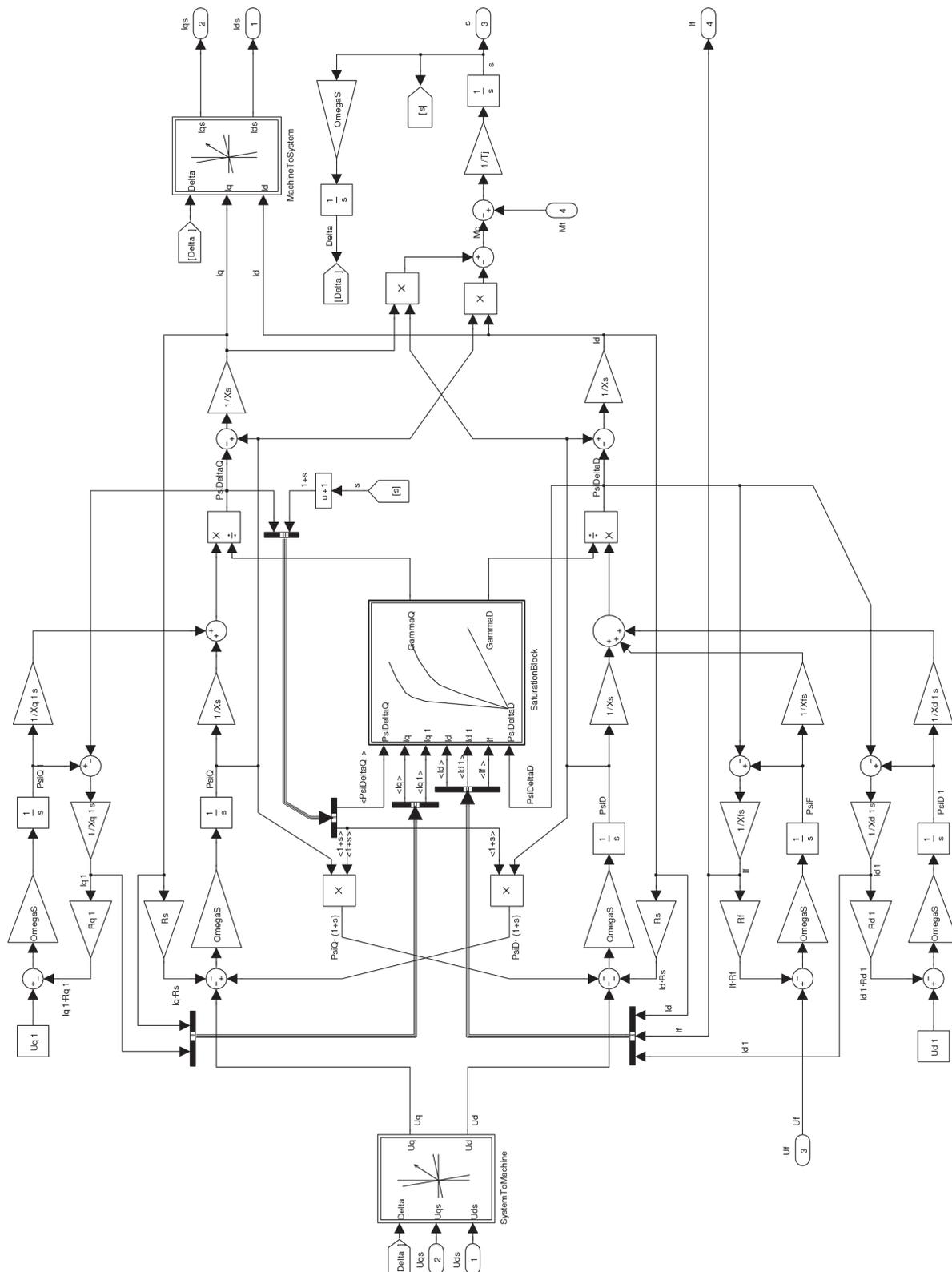


Рис. 3. Структурная схема математической модели синхронного явнополюсного генератора

Fig. 3. Structural scheme of the salient-pole synchronous generator mathematical model

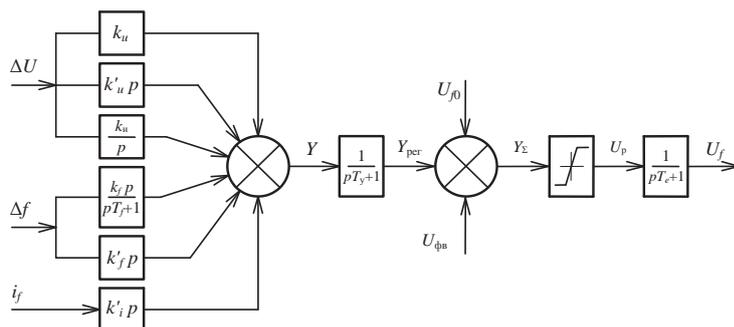


Рис. 4. Идеализированная структурная схема АРВ

Fig. 4. Structure of automatic excitation regulator

Общий сигнал с каналов регулирования определяется:

$$Y = \left(k_u + \frac{k_u}{p} + k'_u p \right) \Delta U + \left(k_f \frac{p}{Tp+1} + k'_f p \right) \Delta f + k'_i p i_f,$$

где ΔU – отклонение фактического напряжения на шинах генератора от заданного значения U_{j0} ; Δf – сигнал отклонения частоты напряжения генератора от номинальной; i_f – ток возбуждения синхронного генератора; $k_u, k_u', k_u'', k_f, k_f', k_f'', k_i, k_i', k_i''$ – коэффициенты усиления соответствующих каналов.

Постоянную времени запаздывания суммарного сигнала с каналов регулирования для современных устройств АРВ можно принять равной постоянной времени тиристорного моста $T_y = 0,03 \dots 0,04$ с [18]. Сигнал $Y_{\text{пер}}$ представляет величину отклонения напряжения от заданного значения, определенную в соответствии с необходимым законом регулирования. Суммарный сигнал установленного значения напряжения на зажимах генератора U_{j0} , отклонения $Y_{\text{пер}}$ и напряжения форсировки возбуждения $U_{\text{фв}}$ ограничивается значениями, соответствующими допустимой кратности форсировки возбуждения по напряжению.

Постоянные времени возбудителей современных диодных бесщеточных систем возбуждения составляют порядка $0,08 \dots 0,1$ с [19, 20].

Моделирование первичного двигателя

Скорость вращения ротора первичного двигателя определяется регулятором частоты вращения, подробное описание которого приводится в [21]. Структурная схема устройства представлена на рис. 5.

Сигнал на выходе измерительного преобразователя определяется по выражению [22]:

$$\eta_\omega = \begin{cases} \frac{1}{\sigma} \left(s - \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2} \right), & s > \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2}; \\ 0, & |s| \leq \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2}; \\ \frac{1}{\sigma} \left(s + \frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2} \right), & s < -\frac{\Delta s_{\text{нч}}}{2}, \end{cases}$$

где σ – статизм регулирования, $\sigma = 4,5 \pm 0,5 \%$; s – скольжение ротора относительно синхронно вращающейся системы координат; $\Delta s_{\text{нч}}$ – зона нечувствительности регулятора первичного двигателя, $\Delta s_{\text{нч}} = 0,15$ Гц.

Общее выражение для сигнала на выходе элемента сравнения первичного двигателя любого типа имеет вид:

$$\eta = \eta_0 + \eta_s - \eta_\omega,$$

где η_0 – сигнал на выходе механизма управления первичного двигателя, η_s – сигнал на выходе электрогидравлического преобразователя, предназначенного для экстренного изменения мощности паровых турбин; для газопоршневого агрегата $\eta_s = 0$.

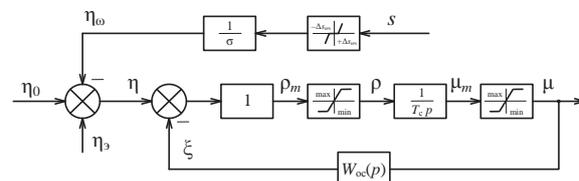


Рис. 5. Структурная схема регулятора частоты вращения

Fig. 5. Structure of speed rotate regulator

Выходной сигнал ρ усилителя пропорционален разности сигналов, поданных на вход, и при этом ограничен минимальным и максимальным значениями:

$$\rho = \begin{cases} \rho_{\max}, & \eta - \xi \geq \rho_{\max}; \\ \eta - \xi, & \rho_{\min} < \eta - \xi < \rho_{\max}; \\ \rho_{\min}, & \eta - \xi \leq \rho_{\min}, \end{cases}$$

где ξ – корректирующий сигнал отрицательной обратной связи; ρ_{\max} – максимальное значение сигнала на выходе усилителя (при необходимости увеличения скорости вращения ротора первичного двигателя) при наборе нагрузки; ρ_{\min} – минимальное значение сигнала на выходе усилителя (при необходимости снижения скорости вращения ротора первичного двигателя) при сбросе нагрузки.

Положение регулирующего органа μ ограничено максимальным и минимальным значениями μ_{\min}, μ_{\max} [21]:

$$\mu_{\min} \leq \mu \leq \mu_{\max};$$

$$\mu_{\min} = \frac{P_{\tau, \min}}{P_{\tau, \text{ном}}};$$

$$\mu_{\max} = \frac{P_{\tau, \max}}{P_{\tau, \text{ном}}},$$

где $P_{\tau, \min}$, $P_{\tau, \max}$, $P_{\tau, \text{ном}}$ – минимальная, максимальная и номинальная мощности первичного двигателя.

Скорость перемещения регулирующего органа первичного двигателя определяется как:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{\rho}{T_c},$$

где T_c – постоянная времени сервомотора, $T_c \approx 0,1 \dots 0,2$ с [9, 21],

Граничные значения ρ могут определяться:

$$\rho_{\min} = \mu_{\min} - \mu_{\max}.$$

$$\rho_{\max} = 0,3(\mu_{\max} - \mu_{\min}).$$

В зависимости от задач, предъявляемых к регулятору частоты вращения, он оснащается жесткой, издромной или комбинированной обратными связями [23].

Жесткая обратная связь применяется при необходимости создания статической характеристики регулирования синхронного генератора:

$$\frac{\xi}{\mu} = K_{\text{жос}},$$

где $K_{\text{жос}}$ – коэффициент жесткой обратной связи.

Гибкая обратная связь обеспечивает создание астатической характеристики регулирования синхронного генератора:

$$\frac{\xi}{\mu} = K_{\text{гос}} \frac{T_n p}{T_n p + 1},$$

где $K_{\text{гос}}$ – коэффициент гибкой обратной связи; T_n – постоянная времени издрома [24].

Комбинированная связь представляет собой статическое звено с измененными динамическими свойствами:

$$\frac{\xi}{\mu} = K_{\text{жос}} + K_{\text{гос}} \frac{T_n p}{T_n p + 1}.$$

Первичный двигатель упрощенно может быть представлен в виде аperiodического звена:

$$M_{\tau} = \frac{\mu}{T_{\text{нд}} p + 1},$$

где $T_{\text{нд}}$ – постоянная времени первичного двигателя: для газопоршневых двигателей $T_{\text{нд}} \approx 1 \dots 3,5$ с.

Моделирование переходных режимов

Моделирование переходных режимов выполнялось на примере работы газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ ДГ98М на базе синхронного явнополюсного генератора СГСБ 900К-12В2 на изменяющуюся автономную нагрузку. Параметры элементов модели приводятся в относительных единицах при номинальных условиях генератора.

Генератор:

- $P_{\text{ном}} = 1$ МВт, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$; $U_{\text{ном}} = 6,3$ кВ;
- $x_{ad} = 1,959$; $x_{aq} = 1,113$;
- $x_{\sigma} = 0,162$; $R_s = 0,0115$;
- $x_{f\sigma} = 0,274$; $R_f = 0,002$;
- $x_{d1\sigma} = 0,184$; $R_{d1} = 0,054$; $x_{q1\sigma} = 0,138$; $R_{q1} = 0,045$.

Регулятор возбуждения:

- $I_{\text{ном}} = 1,583$;
- $K_{u/\max} = 2$; $K_u = 15$; $K_u' = 5$; $K_{\text{инт}} = 0$;
- $T_e = 0,1$; $T_y = 0,04$;

Газопоршневой агрегат и регулятор скорости вращения:

- $\sigma = 4,0$ %; $\Delta s = 0,15$ Гц;
- $\rho_{\min} = -1,25$; $\rho_{\max} = 0,375$;
- $\mu_{\min} = 0$; $\mu_{\max} = 1,25$;
- $T_c = 0,1$ с; $T_{\text{нд}} = 1,25$ с.

Нагрузка моделируется изменяющимися сопротивлениями для различных интервалов времени. Для моделирования рабочих режимов сопротивления нагрузки принимают значения:

- $t = 0 \dots 6$ с, $R = 1,6$; $X = 1,2$ (загрузка генератора 50 %, $\cos \varphi = 0,8$);
- $t = 6 \dots 25$ с, $R = 0,8$; $X = 0,6$ (загрузка генератора 100 %, $\cos \varphi = 0,8$).

Ввиду громоздкости моделей элементов, приведенных на рис. 3–5, имеет смысл реализовать их в виде отдельных подсистем *Simulink* [13]. Графические изображения блоков соответствующих моделей представлены на рис. 6. Схема, в соответствии с которой производится моделирование переходных процессов, представлена на рис. 7.

Результаты расчета переходных процессов представлены на рис. 8. Результаты испытания агрегата мини-ТЭЦ ДГ98М приведены на рис. 9.

Резкое изменение нагрузки генератора не может сопровождаться мгновенным изменением выходных параметров регуляторов газопоршневого агрегата, что объясняется наличием электромагнитной и механической инерции элементов систем управления машины. Кроме того, ввиду относительно большого значения инерционной постоянной T_j вращающихся масс машины резкое изменение нагрузки агрегата сопровождается забросом скорости вращения ротора (рис. 8, а; 9, а). Поскольку регулятор скорости вращения первичного двигателя настраивается на статический закон регулирования ($\sigma \neq 0$ [24]), установившиеся значения скорости вращения ротора машины имеют различные величины для каждого состояния нагрузки.

Изменение напряжения на протяжении нескольких периодов при набросе нагрузки (рис. 8, б) объясняется изменением размагничивающей реакции якоря и скорости вращения ротора синхронной машины, а также изменением запаса энергии магнитного поля сети за счет увеличения ее общей индуктивности. Восстановление напряжения обеспечивается работой АРВ генератора.

Анализ полученных результатов моделирования переходных процессов на ЭВМ (рис. 8) и их

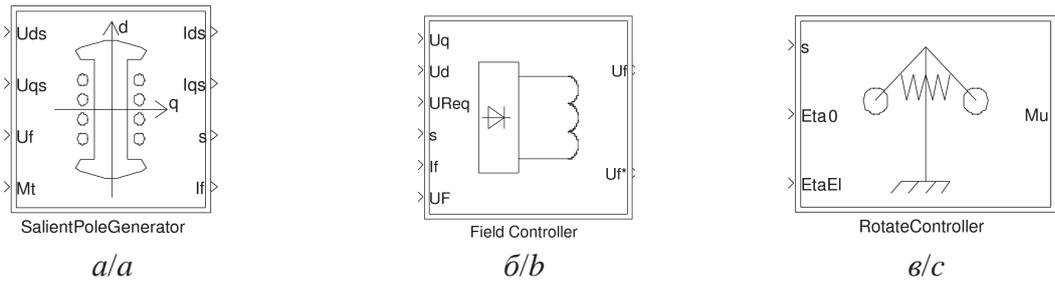


Рис. 6. Отдельные блоки модели агрегата мини-ТЭЦ: а) синхронный явнополюсный генератор; б) регулятор возбуждения генератора; в) регулятор частоты вращения

Fig. 6. Parts of mini-CHP blocks: a) synchronous salient-pole generator; b) automatic excitation regulator; c) speed rotate regulator

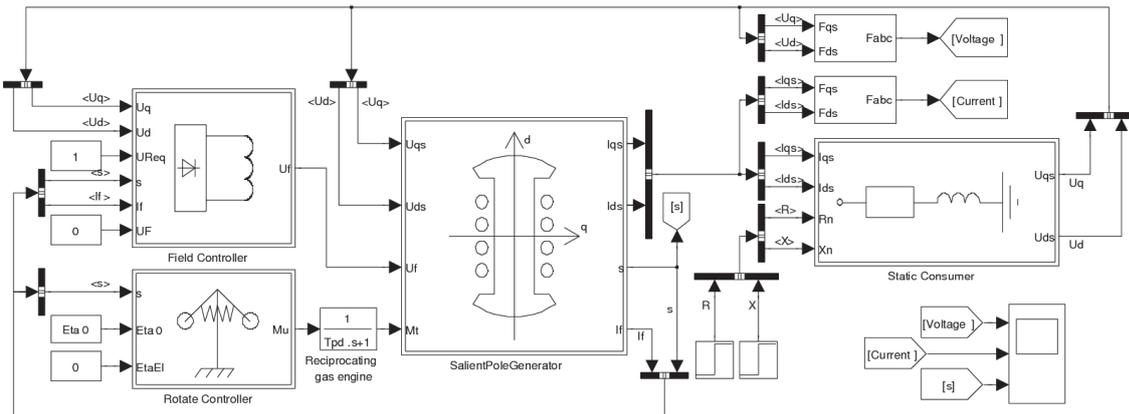


Рис. 7. Моделирование переходных процессов газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора

Fig. 7. Transient modelling of reciprocating gas engine based on a salient-pole synchronous generator

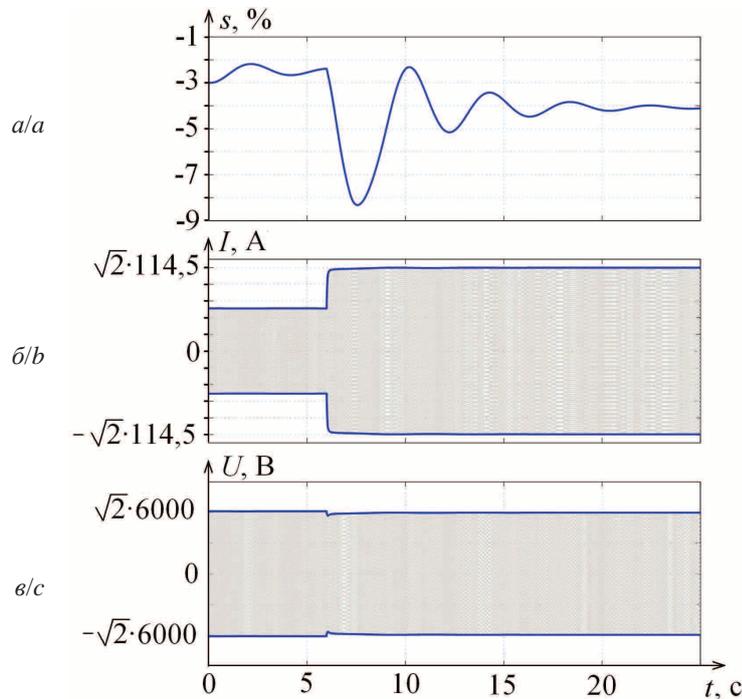


Рис. 8. Результаты моделирования переходных процессов газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ на базе явнополюсного синхронного генератора: а) скольжение ротора генератора относительно синхронной скорости вращения; б) ток нагрузки; в) изменение напряжения на зажимах генератора

Fig. 8. Transients modelling of reciprocating gas engine based on a salient-pole synchronous generator: a) rotor slide; b) current; c) voltage

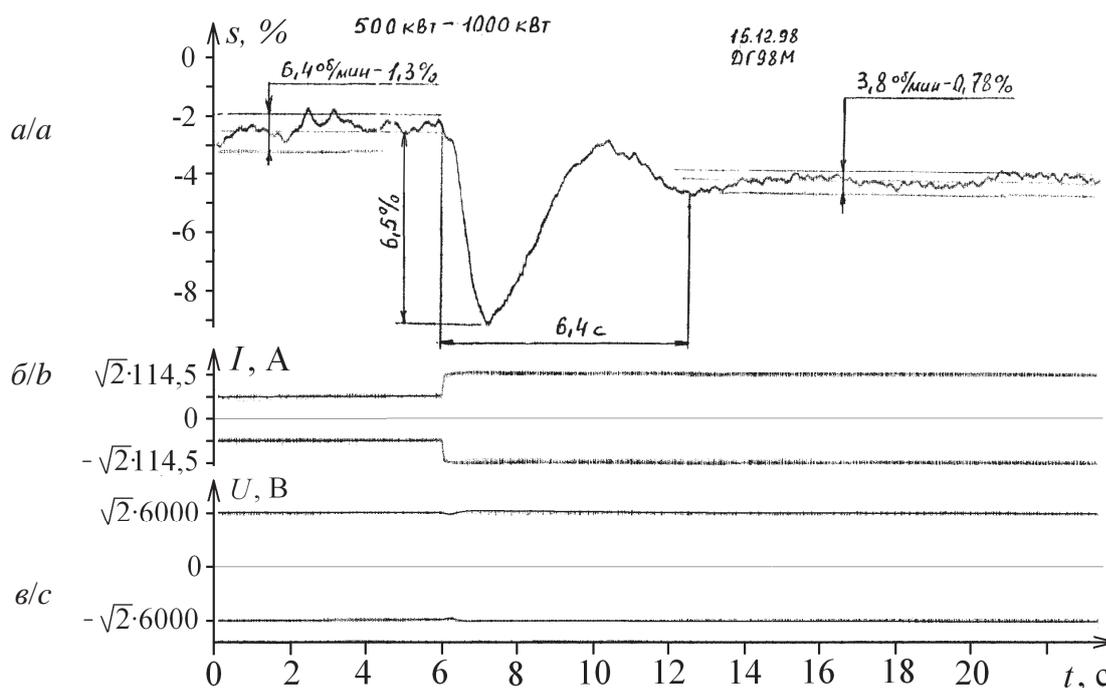


Рис. 9. Результаты испытания агрегата мини-ТЭЦ на базе газопоршневого агрегата ДГ98М: а) скольжение ротора генератора относительно синхронной скорости вращения; б) ток нагрузки; в) напряжение на зажимах генератора

Fig. 9. The test results of reciprocating gas engine based on a salient-pole synchronous generator: a) rotor slide; b) current; c) voltage

сравнение с результатами экспериментов (рис. 9) подтверждает адекватность предложенной математической модели. Расхождение результатов эксперимента и математического моделирования не превышает 5 %.

Выводы

Разработана математическая модель газопоршневого агрегата мини-ТЭЦ на базе синхронного явнополюсного генератора, учитывающая действие регуляторов возбуждения и частоты вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция применения и основные технические решения типового ряда мини-ТЭЦ / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, Е.Б. Солнцев, А.Г. Воеводин, Е.Н. Соснина, А.М. Мамонов, А.А. Петров // Промышленная энергетика. – 2010. – № 7. – С. 2–6.
2. Ackermann T., Knyazkin V. Interaction between Distributed Generation and the Distribution Network: Operation Aspects // Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES. – Yokohama, 2002. – V. 2. – P. 1357–1362.
3. Faille D., Mondon C., Al-Nasrawi B. MCHP Optimization by Dynamic Programming and Mixed Integer Linear Programming // Proc. of the 14th International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems. – Taiwan, 2007. – P. 572–577.
4. Арцишевский Я.Л., Земцов А.А. Как уменьшить ущербы при аварийном переходе мини-ТЭЦ в автономный режим // Релейщик. – 2014. – № 4 (20). – С. 35–39.
5. Configuration, modelling and control of a microgrid for commercial buildings application / F. Gonzalez-Espin, N. Chang, V. Valdivia-Guerrero, R. Foley // 15th European Conference on Power Electronics and Applications. – Lille, 2013. – P. 1–10.

ния. Представленная модель может использоваться при выполнении:

- 1) расчета электромагнитных и электромеханических переходных процессов в сетях, имеющих собственный источник электроэнергии (мини-ТЭЦ);
- 2) настройки системы возбуждения генераторов мини-ТЭЦ;
- 3) настройки системы управления первичными газопоршневыми двигателями мини-ТЭЦ;
- 4) расчета устойчивости системы с собственными источниками электроэнергии.

6. Пачурин Г.В., Маслеева О.В., Петров А.А. Экологическая оценка строительства мини-ТЭЦ в жилых районах // Экология и промышленность России. – 2010. – № 5. – С. 52–54.
7. Шумовое загрязнение окружающей природной среды мини-ТЭЦ / О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин, Е.Б. Солнцев, А.А. Петров // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8–2. – С. 291–294.
8. РД 153–34.0–20.527–98 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
9. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов. изд. 2-е, перераб. и доп. / И.А. Груздев, К.П. Кадомская, Л.А. Кучумов, Я.Н. Лугинский, М.Г. Портной, Н.И. Соколов. – М.: Энергия, 1970. – 400 с.
10. Lipo T.A., Komatsu T., Shinohara K. Simulation of a Salient Pole Synchronous Machine with Both Field Pole and Stator Core Saturation // International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics. – Bodrum, 2007. – P. 331–336.
11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: в 2 т. Т. 2. – М.: ИД МЭИ, 2006. – 532 с.

12. Математическая модель явнополюсного синхронного генератора мини-ТЭЦ / Г.Я. Вагин, Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.А. Петров // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – Ч. 2. – URL: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_91_Vagin.pdf_c760cca39c.pdf (дата обращения: 31.05.2015).
13. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
14. Development of a Control Strategy for Mini CHP Plants for an Active Voltage Management in Low Voltage Networks / D.I. Hidalgo Rodriguez, L. Spitalny, J. Myrzik, M. Braun // 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. – Berlin, 2012. – P. 1–8.
15. Shaltout A.A., Abdel-Halim M.A. Damping and synchronizing torques of salient-pole generators with accurate representation of saturation // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1995 – V. 10. – № 1. – P. 1–9.
16. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: ИД МЭИ, 2011. – 280 с.
17. Коротков В.Ф. Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах. – М.: ИД МЭИ, 2013. – 416 с.
18. Белослудцев А.М., Кавалеров Б.В. Математическое моделирование системы возбуждения и системы автоматического управления синхронного генератора для программно-моделирующего комплекса // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. – № 3. – С. 268–273.
19. Автоматика электроэнергетических систем / О.П. Алексеев, В.Е. Казанский, В.Л. Козис, Н.И. Овчаренко, В.Л. Сиротинский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 480 с.
20. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.
21. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. Расчеты: Монография. – С-Пб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 300 с.
22. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
23. Вайнштейн Р.А., Коломиец Н.В., Шестакова В.В. Основы управления режимами энергосистем по частоте и активной мощности, по напряжению и реактивной мощности. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 96 с.
24. Автоматизация энергетических систем / А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, М.М. Савин. – М.: Энергия, 1977. – 440 с.

Поступила 01.06.2015 г.

UDC 621.311.001.57

MATHEMATICAL MODEL OF MINI-CHP BASED ON SALIENT-POLE SYNCHRONOUS GENERATOR

Gennadiy Ya. Vagin,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: vagin.g.ya@mail.ru

Evgeniy B. Soltsev,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: sol10001@mail.ru

Andrey M. Mamonov,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: mam800@mail.ru

Anton A. Petrov,

R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 24, Minin street, N. Novgorod, 603950, Russia. E-mail: petrov85@pisem.net

Many factors affect transients in electrical systems with mini-CHP. Development of a reciprocating gas engine mathematical model based on a salient-pole synchronous generator will improve the calculations accuracy of transient and system stability. It will configure and verify the operation of voltage and rotation speed regulators of the prime engine.

The main aim of the study is to develop the reciprocating gas engine mathematical model based on salient pole synchronous generator, which allows calculating, analyzing and configuring the processes in electrical 6–10 kV system with mini-CHP.

The methods used in the study: analytical methods and calculation of transient status and parameters in the Simulink integrated to MATLAB.

The results. The reciprocating gas engine mathematical model based on a salient-pole synchronous generator includes: 1. Automatic control excitation synchronous generator. 2. Prime engine with speed control. 3. Salient-pole synchronous generator model. The saturation of the model is achieved by using the method of partial magnetic characteristics. This method allows taking into account correctly the leakage fluxes of the excitation winding of the loaded synchronous generator. The generator model uses many factors that affect the transients in the station. It leads to more accurate results. Using the method of partial magnetic characteristics allows taking into account the changes in the parameters of the generator equivalent circuit without reliable information on magnetic properties of the materials used in the machine design and production.

Key words:

Complex model of mini-CHP, salient-pole synchronous generator, reciprocating gas engine, excitation system, magnetic characteristics, Park-Gorev differential equation, transients.

REFERENCES

- Vagin G.Ya., Loskutov A.B., Solntsev E.B., Voevodin A.G., Sosnina E.N., Mamonov A.M., Petrov A.A. Kontseptsiya primeneniya i osnovnye tekhnicheskie resheniya tipovogo ryada mini-TETs [Concept of application and basic technical solutions of typical mini-CHP-plants]. *Industrial power engineering*, 2010, no. 7, pp. 2–6.
- Ackermann T., Knyazkin V. Interaction between Distributed Generation and the Distribution Network: Operation Aspects. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. Yokohama, 2002. Vol. 2, pp. 1357–1362.
- Faille D., Mondon C., Al-Nasrawi B. MCHP Optimization by Dynamic Programming and Mixed Integer Linear Programming. *Proc. of the 14th International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*. Taiwan, 2007. pp. 572–577.
- Artsishevskiy Ya.L., Zemtsov A.A. Kak umenshit ushcherby pri avariynom perekhode mini-TETs v avtonomny rezhim [How to reduce losses in case of emergency transition mini-CHP to offline mode]. *Releyshchik*, 2014, no. 4 (20), pp. 35–39.
- Gonzalez-Espin F., Chang N., Valdivia-Guerrero V., Foley R. Configuration, modelling and control of a microgrid for commercial buildings application. *15th European Conference on Power Electronics and Applications*. Lille, 2013. pp. 1–10.
- Pachurin G.V., Masleeva O.V., Petrov A.A. Ekologicheskaya otsenka stroitelstva mini-TETs v zhilykh rayonakh [Ecological Estimation of Construction of Mini-Sized Heat-Electric Generating Stations in Residential Areas]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2010, no. 5, pp. 52–54.
- Masleeva O.V., Pachurin G.V., Solntsev E.B., Petrov A.A. Shumovoe zagryaznenie okruzhayushchey prirodnoy sredy mini-TETs [Noise pollution of the natural environment by mini-CHP]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, no. 8–2, pp. 291–294.
- RD 153–34.0–20.527–98 Rukovodnyashchie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya [Guidance on calculation of short-circuit and selection of electrical equipment]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2002. 152 p.
- Gruzdev I.A., Kadomskaya K.P., Kuchumov L.A., Lugin'skiy Ya.N., Portnoy M.G., Sokolov N.I. *Primenenie analogovykh vychislitelnykh mashin v energeticheskikh sistemakh. Metody issledovaniya perekhodnykh protsessov* [Application of analog computers in power systems. Methods of studying transients]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 400 p.
- Lipo T.A., Komatsu T., Shinohara K. Simulation of a Salient Pole Synchronous Machine with Both Field Pole and Stator Core Saturation. *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*. Bodrum, 2007. pp. 331–336.
- Ivanov-Smolenskiy A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, MEI Publ. house, 2006. Vol. 2, 532 p.
- Vagin G.Ya., Solntsev E.B., Mamonov A.M., Petrov A.A. Matematicheskaya model yavnopolynsnogo sinkhronnogo generatora mini-TETs [Mathematical model of salient pole synchronous generator of mini-CHP]. *Inzhenerny vestnik Dona*, 2015, no. 2, p. 2. Available at: http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_91_Vagin.pdf_c760cca39c.pdf (accessed 31 May 2015).
- Chernykh I.V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SIMULINK: an environment for creating engineering applications]. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 2003. 496 p.
- Hidalgo Rodriguez D.I., Spitalny L., Myrzik J., Braun M. Development of a Control Strategy for Mini CHP Plants for an Active Voltage Management in Low Voltage Networks. *3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*. Berlin, 2012. pp. 1–8.
- Shaltout A.A., Abdel-Halim M.A. Damping and synchronizing torques of salient-pole generators with accurate representation of saturation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, vol. 10, no. 1, pp. 1–9.
- Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Kuzmenko A.A. *Novye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh sistem upravleniya protsessami generirovaniya elektroenergii* [New technology of designing modern power generation control systems]. Moscow, MEI Publ. house, 2011. 280 p.
- Korotkov V.F. *Avtomaticheskoe regulirovanie v elektroenergeticheskikh sistemakh* [Automatic control in power systems]. Moscow, MEI Publ. house, 2013. 416 p.
- Belosludtsev A.M., Kavalero B.V. Matematicheskoe modelirovanie sistemy vzbuzhdeniya i sistemy avtomaticheskogo upravleniya sinkhronnogo generatora dlya programmno-modeliruyushchego kompleksa [Mathematical modeling of the excitation system and automatic control system of synchronous generator for software-modeling complex]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2009, no. 3, pp. 268–273.
- Alekseev O.P., Kazanskiy V.E., Kozis V.L., Ovcharenko N.I., Sirotnitskiy V.L. *Avtomatika elektroenergeticheskikh sistem* [Automation of electric power systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 480 p.
- Vaynshteyn R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem v raschetakh ustanovivshikhsya rezhimov i perekhodnykh protsessov* [Mathematical models of elements of electric power systems in calculation of the steady states and transients]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 115 p.
- Merkuryev G.V., Shargin Yu.M. *Ustoychivost energosistem. Raschety: monografiya* [Power systems stability]. St-Petersburg, Tsentr podgotovki kadrov energetiki, 2006. 300 p.
- Gurevich Yu.E., Libova L.E., Okin A.A. *Raschety ustoychivosti i protivovariyynoy avtomatiki v energosistemakh* [Calculations of stability and emergency control in power systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 390 p.
- Vaynshteyn R.A., Kolomiets N.V., Shestakova V.V. *Osnovy upravleniya rezhimami energosistem po chastote i aktivnoy moshchnosti, po napryazheniyu i reaktivnoy moshchnosti* [Basic control modes of the power system frequency and active power, voltage and reactive power]. Tomsk, TPU Publ. house, 2010. 96 p.
- Drozdov A.D., Zasyupkin A.S., Alliluev A.A., Savin M.M. *Avtomatizatsiya energeticheskikh sistem* [Energy system automation]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 440 p.

Received: 01 June 2015.