

## Математическая модель явнополюсного синхронного генератора мини-ТЭЦ

*Г.Я. Вагин, Е.Б. Солнцев, А.М. Мамонов, А.А. Петров*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева*

**Аннотация:** Предложена математическая модель явнополюсного синхронного генератора мини-ТЭЦ, основанная на полных уравнениях Парка-Горева, представленных во взаимной системе относительных единиц. Насыщение машины учитывается с помощью метода частичных характеристик намагничивания, позволяющего наиболее точно оценить изменение параметров схемы замещения генератора при отсутствии полных сведений о магнитных свойствах материалов, применяемых при проектировании и изготовлении машины. Реализация математической модели осуществляется в среде Simulink.

Применение модели возможно при расчете установившихся и переходных режимов в распределительных сетях, содержащих явнополюсные синхронные генераторы.

**Ключевые слова:** явнополюсный синхронный генератор, математическая модель, уравнения Парка-Горева, частичные характеристики намагничивания, переходные процессы.

Актуальным решением проблемы экономии энергоресурсов, повышения надежности электроснабжения и качества электроэнергии является сооружение в непосредственной близости от потребителей мини-ТЭЦ, вырабатывающей электрическую и тепловую энергию [1, 2]. Использование мини-ТЭЦ в системе электроснабжения сопровождается необходимостью проведения трудоемких расчетов, необходимых для оценки ее влияния на параметры режима системы.

Мини-ТЭЦ, скорость вращения роторов первичных двигателей которых не превышает 1500 об/мин, комплектуются явнополюсными синхронными генераторами. Загрузка генераторов станции, работающих на распределительную сеть, может изменяться от минимально допустимой до номинальной, при этом напряжение сети также может меняться под действием различных факторов [3]. Изменение условий эксплуатации генераторов влияет на его параметры, что приводит к необходимости учета многих факторов при моделировании переходных и установившихся режимов работы синхронных явнополюсных генераторов.

Для моделирования синхронных генераторов используется система дифференциальных уравнений Парка-Горева, во взаимной системе относительных единиц имеющая вид (символ «\*» опущен) [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_d = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_d - \psi_q(1+s) - R_s i_d; \\ u_q = -\frac{1}{\omega_c} p\psi_q + \psi_d(1+s) - R_s i_q; \\ u_f = \frac{1}{\omega_c} p\psi_f + R_f i_f \\ u_{d_i} = \frac{1}{\omega_c} p\psi_{d_i} + R_{d_i} i_{d_i}, \quad i = 0..n_d; \\ u_{q_i} = \frac{1}{\omega_c} p\psi_{q_i} + R_{q_i} i_{q_i}, \quad i = 0..n_q; \\ M_T - M_\varepsilon = \frac{T_J}{\omega_c} p\omega = T_J ps, \end{array} \right. \quad (1)$$

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

Из выражений приведенной системы (1) можно получить зависимости для потокосцеплений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_d = -\frac{\omega_c}{p} (u_d + \psi_q(1+s) + R_s i_d); \\ \psi_q = \frac{\omega_c}{p} (-u_q + \psi_d(1+s) - R_s i_q); \\ \psi_f = \frac{\omega_c}{p} (u_f - R_f i_f); \\ \psi_{d_i} = \frac{\omega_c}{p} (u_{d_i} - R_{d_i} i_{d_i}), \quad i = 0..n_d; \\ \psi_{q_i} = \frac{\omega_c}{p} (u_{q_i} - R_{q_i} i_{q_i}), \quad i = 0..n_q. \end{array} \right. \quad (2)$$

Пренебрегая влиянием насыщения на сопротивления рассеяния контуров машины [5], потокосцепления генератора можно представить:

$$\begin{cases} \Psi_d = x_\sigma i_d + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_q = x_\sigma i_q + \Psi_{\delta q}; \\ \Psi_f = x_{f\sigma} i_f + \Psi_{\delta d}; \\ \Psi_{d_i} = x_{di\sigma} i_{d_i} + \Psi_{\delta d}, \quad i = 0 \dots n_d; \\ \Psi_{q_i} = x_{qi\sigma} i_{q_i} + \Psi_{\delta q}, \quad i = 0 \dots n_q. \end{cases} \quad (3)$$

где  $\Psi_{\delta d}$ ,  $\Psi_{\delta q}$  – проекции результирующего потокосцепления воздушного зазора на продольную и поперечную оси соответственно;  $x_\sigma$ ,  $x_{f\sigma}$ ,  $x_{di\sigma}$ ,  $x_{qi\sigma}$  – сопротивления рассеяния соответствующего контура.

В общем случае потокосцепления воздушного зазора можно определить:

$$\begin{cases} \Psi_{\delta d} = \eta_d x_{ad} \left( i_d + i_f + \sum_{i=1}^{n_d} i_{d_i} \right); \\ \Psi_{\delta q} = \eta_q x_{aq} \left( i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{q_i} \right) \end{cases} \quad (4)$$

где  $\eta_d$ ,  $\eta_q$  – эквивалентные коэффициенты, учитывающие насыщение стали явнополюсной машины вдоль соответствующих осей.

Выразив из системы (3) токи и подставив их в (4), получим зависимости  $\Psi_{\delta d}$ ,  $\Psi_{\delta q}$  для явнополюсного генератора:

$$\begin{cases} \Psi_{\delta d} = \frac{\frac{\Psi_d}{x_\sigma} + \frac{\Psi_f}{x_{f\sigma}} + \sum_{i=1}^{n_d} \frac{\Psi_{d_i}}{x_{di\sigma}}}{\Gamma_d}; \\ \Psi_{\delta q} = \frac{\frac{\Psi_q}{x_\sigma} + \sum_{i=1}^{n_q} \frac{\Psi_{q_i}}{x_{qi\sigma}}}{\Gamma_q}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\Gamma_d$ ,  $\Gamma_q$  – проводимости по соответствующим осям:

$$\begin{cases} \Gamma_d = \frac{1}{\eta_d x_{ad}} + \frac{1}{x_\sigma} + \frac{1}{x_{f\sigma}} + \sum_{i=1}^{n_d} \frac{1}{x_{di\sigma}}; \\ \Gamma_q = \frac{1}{\eta_q x_{aq}} + \frac{1}{x_\sigma} + \sum_{i=1}^{n_q} \frac{1}{x_{qi\sigma}}. \end{cases} \quad (6)$$

Учет насыщения позволяет получить более точные значения параметров, характеризующих состояние синхронной машины. Основной проблемой при моделировании синхронного генератора с учетом насыщения является отсутствие информации о магнитных характеристиках применяемых материалов. В [6] проведен анализ кратностей сверхпереходных токов КЗ на выводах генераторов мощностью 0,2 ÷ 13,5 МВт, в предшествующем режиме работавших с номинальной загрузкой. Результаты проведенных расчетов показали высокую однородность параметров синхронных машин отечественного и импортного производства, что позволяет сделать вывод о возможности применения общих характеристик намагничивания при расчете переходных процессов и установившихся режимов.

В условиях отсутствия исчерпывающей информации о магнитных свойствах материалов генератора учет насыщения явнополюсной машины может осуществляться с использованием соответствующих нормальных частичных характеристик намагничивания [5]: магнитопровода статора и зазора  $\Phi_r = f(F_r)$ ; потока рассеяния  $\Phi_{f\sigma} = f(F_{1f})$ ; магнитопровода ротора  $\Phi_2 = f(F_2)$ , представленных на рис. 1, а.

Построение частичных характеристик намагничивания машины, как и методика проектирования явнополюсных синхронных генераторов, основаны на вычислении средних величин магнитной индукции в магнитопроводах отдельных элементов машины [7]. Зависимости магнитных напряжений элементов машины от соответствующих магнитных потоков можно представить в общем виде:

$$F = k(\Phi) \Phi, \quad (7)$$

где  $k(\Phi)$  – коэффициент, устанавливающий взаимосвязь между  $\Phi$  и  $F$  (рис. 2, а), полученный из соответствующих характеристик намагничивания  $\Phi = f(F)$  (рис. 1, а).

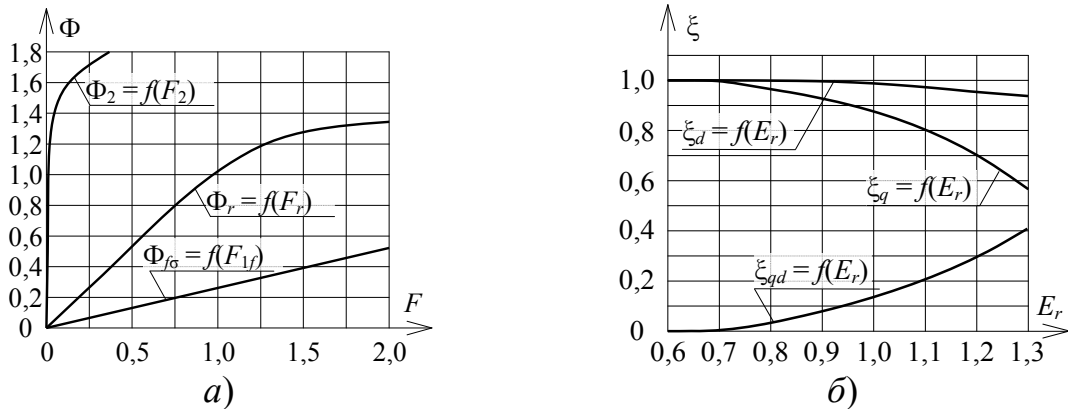


Рис. 1. – Нормальные характеристики намагничивания синхронной явнополюсной машины: а – частичные кривые намагничивания; б - коэффициенты насыщения машины

Учет насыщения с использованием частичных характеристик намагничивания позволяет правильно учесть потоки рассеяния обмотки возбуждения синхронного генератора при нагрузке и вычислить значение ее МДС  $F_{fm}$  [5], в относительных единицах равную кратности тока возбуждения холостого хода машины. Во взаимной системе относительных единиц ток возбуждения можно представить [4]:

$$i_f = F_{fm} \frac{\operatorname{tg} \alpha_0}{x_{ad}}. \quad (8)$$

где  $\operatorname{tg} \alpha_0$  – тангенс угла наклона касательной к функции  $\Phi_m = f(F_{1r})$  в точке 0, для нормальной характеристики намагничивания явнополюсной машины:  $\operatorname{tg} \alpha_0 = 1,06$ .

Ввиду линейной зависимости между потокосцеплением воздушного зазора  $\psi_\delta$ , равного:

$$\Psi_{\delta} = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}, \quad (9)$$

результатирующим потоком взаимоиндукции  $\Phi_r$  и эквивалентной ЭДС воздушного зазора машины  $E_r$ , в относительных единицах справедливо:

$$\begin{cases} \Psi_{\delta} = \Phi_r = E_r; \\ \Psi_{\delta d} = \Phi_{rd} = E_{rd}; \\ \Psi_{\delta q} = \Phi_{rq} = E_{rq}. \end{cases} \quad (10)$$

В насыщенной явнополюсной машине поля от различных МДС нельзя считать независимыми [5]. Насыщение машины проявляется в изменении сопротивлений взаимоиндукции генератора в зависимости от величины результирующей ЭДС  $E_r$  (10) с учетом функций  $\xi = f(E_r)$  (рис. 1, б) и введении дополнительного падения магнитного напряжения по продольной оси машины за счет токов, протекающих в ее поперечных контурах. Проекция результирующей МДС статора и зазора  $F_{rd}$  на продольную ось находится по (7), используя  $\Phi_{rd}$  и зависимость  $k_r = f(\Phi_r)$  (рис. 2, а):

$$F_{rd} = k_r(\Phi_{rd}) \Phi_{rd}. \quad (11)$$

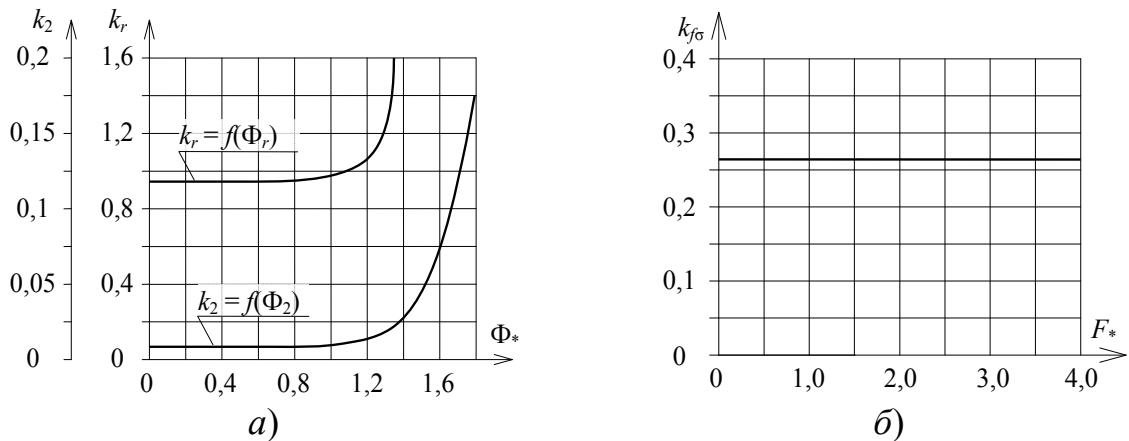


Рис. 2. – Зависимость коэффициентов, учитывающих насыщение явнополюсной машины: а – от величины магнитного потока  $k = f(\Phi)$ ; б – от величины падения магнитного напряжения  $k = f(F)$

С другой стороны, результирующая МДС статора и зазора по продольной оси  $F_{rd}$  является суммой МДС, действующих вдоль оси  $d$ :

$$F_{rd} = F_{1f} + F_{adm} + \sum_{i=1}^{n_d} F_{dmi} - \left| F_{qdm} + \sum_{i=1}^{n_q} F_{qdm i} \right|, \quad (12)$$

где  $F_{1f}$  – МДС, создаваемая обмоткой возбуждения за вычетом магнитного напряжения ротора;  $F_{adm}$  – МДС продольной реакции якоря, действующая аналогично МДС обмотки возбуждения;  $F_{dmi}$  – МДС  $i$ -й демпферной обмотки по продольной оси, действующая аналогично МДС обмотки возбуждения;  $F_{qdm}$  – МДС поперечной реакции якоря, размагничивающая машину по продольной оси, действующая аналогично МДС обмотки возбуждения;  $F_{qdm i}$  – МДС  $i$ -й демпферной обмотки по поперечной оси, размагничивающая машину по продольной оси, действующая аналогично МДС обмотки возбуждения:

$$F_{adm} = \frac{\xi_d x_{ad}}{\operatorname{tg} \alpha_0} i_d; \quad (13)$$

$$F_{dmi} = \frac{\xi_d x_{ad}}{\operatorname{tg} \alpha_0} i_{di}, \quad i = 1 \dots n_d; \quad (14)$$

$$F_{qdm} = \frac{\xi_q \xi_{qd} x_{aq}}{\operatorname{tg} \alpha_0} i_q; \quad (15)$$

$$F_{qdm i} = \frac{\xi_q \xi_{qd} x_{aq}}{\operatorname{tg} \alpha_0} i_{qi}, \quad i = 1 \dots n_q. \quad (16)$$

Коэффициенты насыщения по соответствующим осям  $\xi_d$ ,  $\xi_q$ ,  $\xi_{qd}$  определяются исходя из функций, представленных на рис. 1, б, по значению  $E_r$  (10). Используя найденные значения коэффициентов, определяется выражение для  $F_{1f}$ :

$$F_{1f} = F_{rd} - \frac{\xi_d}{\operatorname{tg} \alpha_0} x_{ad} \left( i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) + \frac{\xi_q \xi_{qd}}{\operatorname{tg} \alpha_0} x_{aq} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{qi} \right|. \quad (17)$$

Поток рассеяния обмотки возбуждения  $\Phi_{f\sigma}$  определяется из зависимости  $\Phi_{f\sigma} = f(F_{1f})$ , которую можно представить как:

$$\Phi_{f\sigma} = k_{f\sigma} F_{1f}, \quad (18)$$

где  $k_{f\sigma}$  – коэффициент взаимосвязи между  $F_{1f}$  и  $\Phi_{f\sigma}$  (рис. 2, б).

Общий поток  $\Phi_2$ , проходящий через обмотку возбуждения, представляет собой сумму:

$$\Phi_2 = \Phi_{f\sigma} + \Phi_{rd}. \quad (19)$$

Из характеристики намагничивания магнитопровода ротора  $\Phi_2 = f(F_2)$ , его магнитное напряжение:

$$F_2 = k_2(\Phi_2) \Phi_2, \quad (20)$$

где  $k_2(\Phi_2)$  – коэффициент взаимосвязи между  $\Phi_2$  и  $F_2$  (рис. 2, а)

Общая МДС обмотки возбуждения определяется как:

$$F_{fm} = F_2 + F_{1f}. \quad (21)$$

Совместная запись уравнений (8) – (21) позволит получить выражения для проекций потокоцепления  $\psi_\delta$  на соответствующие оси:

- для продольной оси  $\psi_{\delta d}$ :

$$\psi_{\delta d} = \frac{[1 + k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}]x_{ad} \left( \frac{i_f}{1 + k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}} + \xi_d \left( i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{d_i} \right) - \xi_{dq} \xi_q \frac{x_{aq}}{x_{ad}} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{q_i} \right| \right)}{\operatorname{tg} \alpha_0 (k_2(\Phi_2) + k_r(\Phi_{rd}) [1 + k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}])}, \quad (22)$$

где

$$\Phi_2 = [1 + k_r(\Phi_{rd})k_{f\sigma}] \Phi_{rd} - \frac{k_{f\sigma}}{\operatorname{tg} \alpha_0} \left[ \xi_d x_{ad} \left( i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{d_i} \right) - \xi_{dq} \xi_q x_{aq} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{q_i} \right| \right]; \quad (23)$$

- для поперечной оси  $\psi_{\delta q}$ :

$$\psi_{\delta q} = \xi_q x_{aq} \left( i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{q_i} \right). \quad (24)$$

Сопоставляя полученные выражения с (4), получим выражения для эквивалентных коэффициентов, учитывающих насыщение явнополюсного генератора:



$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_d = \frac{\left[ 1 + k_2(\Phi_2)k_{f\sigma} \left( \frac{i_f}{1 + k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}} + \xi_d \left( i_d + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right) - \xi_{dq} \xi_q \frac{x_{aq}}{x_{ad}} \left| i_q + \sum_{i=1}^{n_q} i_{qi} \right| \right) \right]}{\operatorname{tg} \alpha_0 (k_2(\Phi_2) + k_r(\Phi_{rd}) [1 + k_2(\Phi_2)k_{f\sigma}]) \left( i_d + i_f + \sum_{i=1}^{n_d} i_{di} \right)}; \\ \eta_q = \xi_q. \end{array} \right. \quad (25)$$

*Simulink*-модель блока насыщения машины (*SaturationBlock*), реализующая равенства (25) приведена на рис. 3. Математическая модель синхронного явнополюсного генератора, реализованная в операционной среде *Simulink* [8] в соответствии с выражениями (1) – (6), приведена на рис. 4. Блоки *SystemToMachine* и *MachineToSystem* переопределяют векторы напряжения и тока из синхронно вращающейся системы координат в жестко связанную с ротором генератора систему координат и обратно [4, 9].

Моделирование переходных процессов осуществлялось на примере предварительно нагруженного синхронного явнополюсного генератора СГСБ 900К-12В2 при резком изменении статической автономной нагрузки. Параметры генератора:

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

Для исключения влияния устройств регулирования на характер переходного процесса [10, 11], на входы  $U_f$  и  $M_t$  генератора, подаются постоянные сигналы, соответствующие загрузке машины в исходном состоянии при номинальном напряжении на его зажимах и нулевом скольжении ротора относительно синхронной скорости вращения. Параметры нагрузки и результаты моделирования даны в относительных единицах при номинальных условиях генератора (табл. 1).

Результаты моделирование переходных режимов с использованием разработанной модели (рис. 5) соответствуют реальным представлениям о

протекании процессов в явнотолусной синхронной машине.

Таблица 1

Параметры автономной нагрузки при моделировании переходных процессов

№ расчета	Исходное состояние				Конечное состояние			
	R, о.е.	X, о.е.	Z, о.е.	cos φ	R, о.е.	X, о.е.	Z, о.е.	cos φ
1	0,8	0,6	1	0,8	2,286	1,714	2,857	0,8
2	2,286	1,714	2,857	0,8	0,8	0,6	1	0,8
3	0,8	0,6	1	0,8	0	0	0	—
4	2,286	1,714	2,857	0,8	0	0	0	—

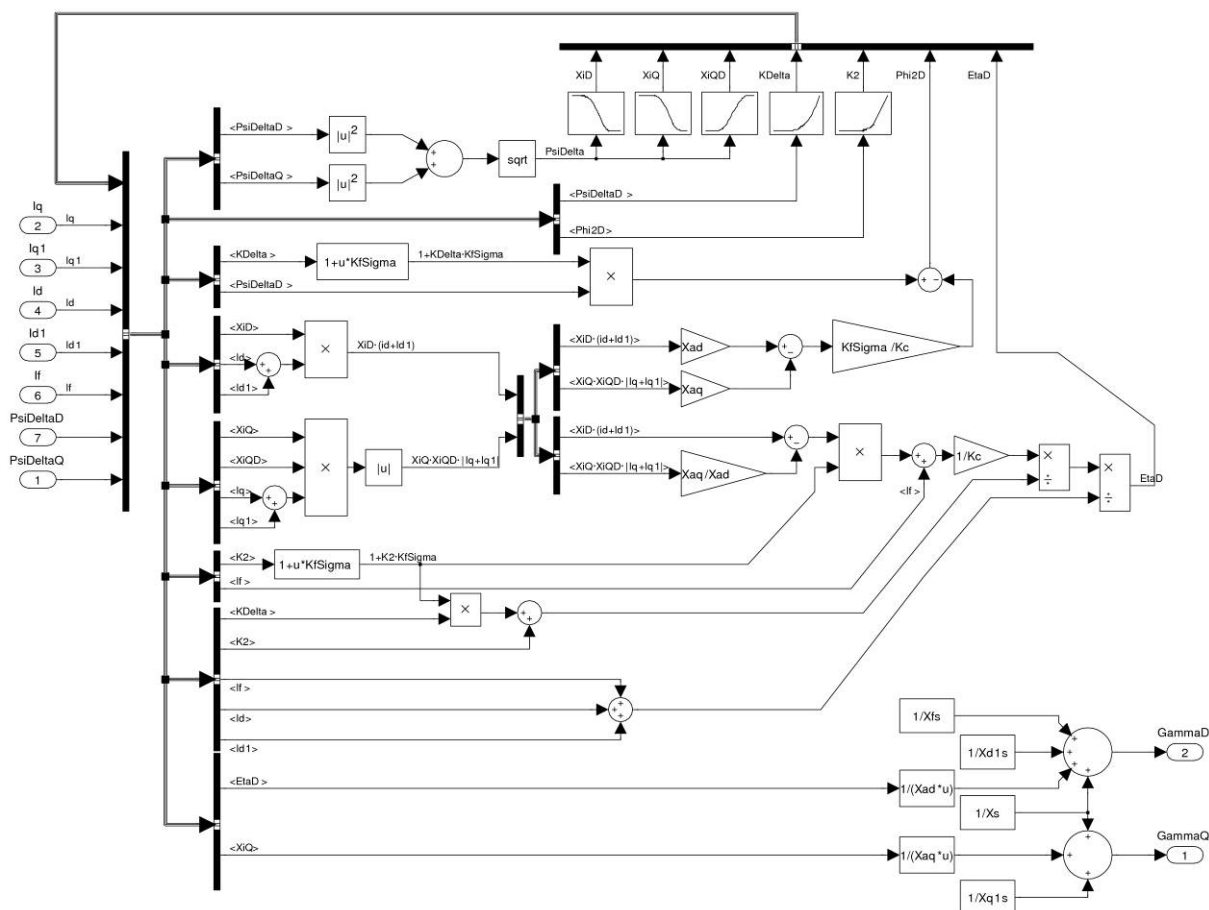


Рис. 3. – Математическая модель блока насыщения *SaturationBlock* синхронного явнотолусного генератора

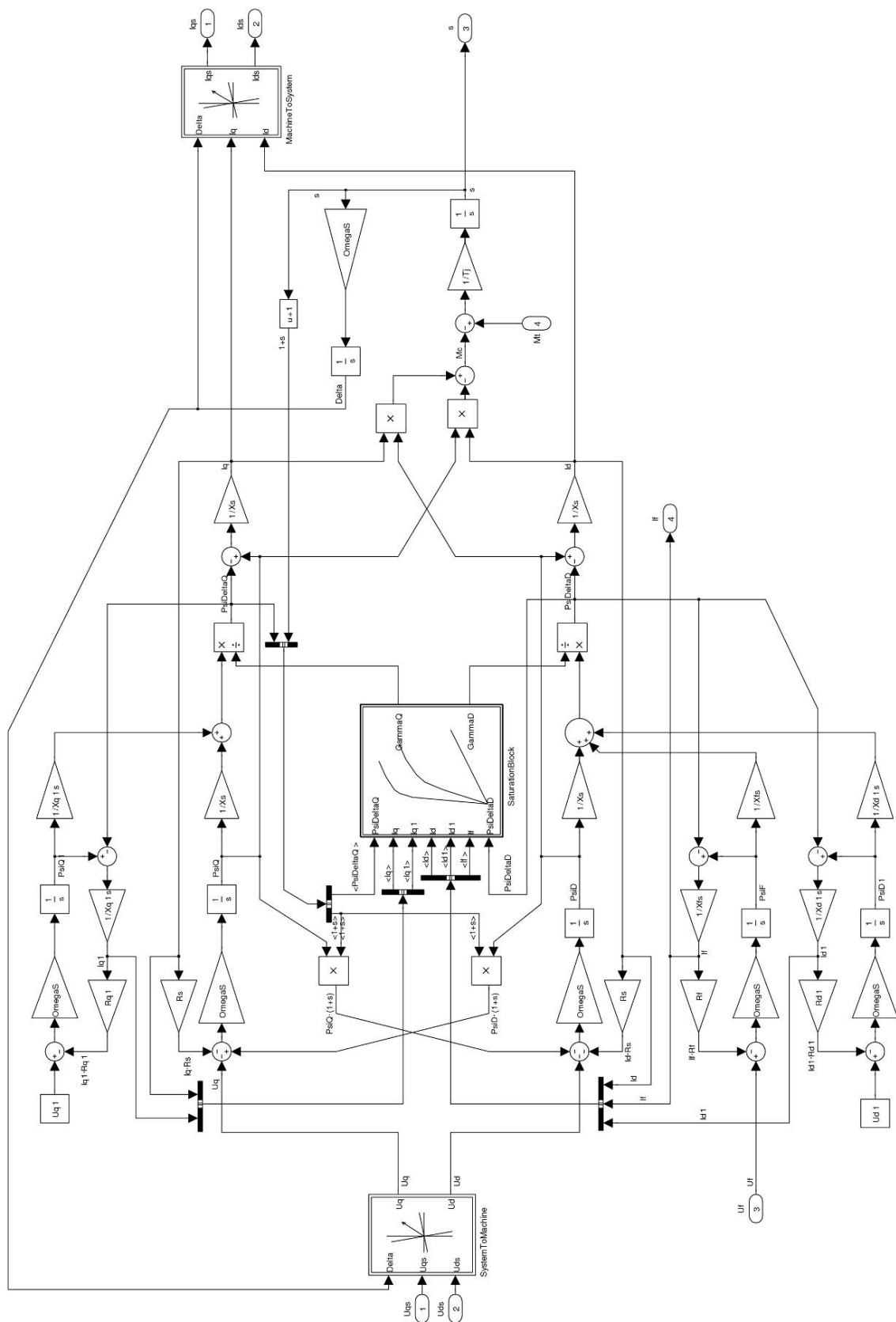


Рис. 4. – Структурная схема математической модели синхронного явнополюсного генератора

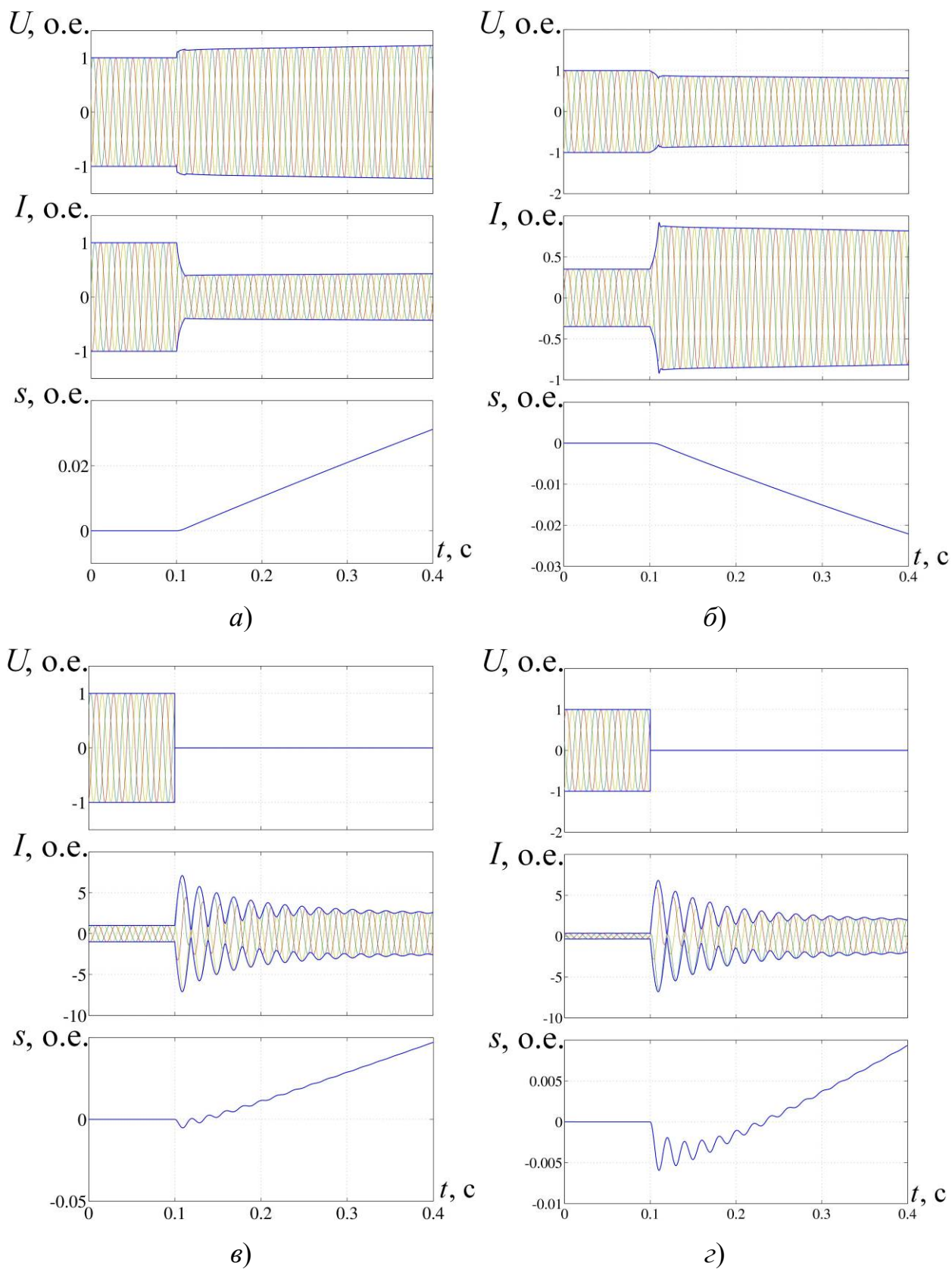


Рис. 5. – Результаты моделирования переходных процессов в соответствии с табл. 1: *a* - расчет №1; *б* – расчет №2; *в* – расчет №3; *г* – расчет №4

**Выводы.** Разработана математическая модель синхронного явнополюсного генератора, базирующаяся на дифференциальных уравнениях Парка-Горева, учитывающая с помощью метода частичных характеристик намагничивания насыщение машины. Это позволяет повысить точность расчетов переходных и установившихся режимов в электрической сети за счет учета изменения потока рассеяния обмотки возбуждения машины при нагрузке.

Представленную математическую модель предлагается использовать при расчетах установившихся и переходных режимов, расчетах устойчивости, настройках регуляторов напряжения и скорости вращения первичных двигателей, а также системы противоаварийной автоматики мини-ТЭЦ на базе явнополюсных синхронных генераторов.

### Литература

1. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Солнцев Е.Б., Воеводин А.Г., Соснина Е.Н., Мамонов А.М., Петров А.А. Концепция применения и основные технические решения типового ряда мини-ТЭЦ // 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, Vol. 2, 2002. pp. 1357-1362.
3. Шаров Ю.В., Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г., Воробьев А.Ю. Управление качеством электроэнергии. М.: ИД МЭИ, 2006. 320 с.
4. Груздев И.А., Кадомская К.П., Кучумов Л.А., Лугинский Я.Н., Портной М.Г., Соколов Н.И. Применение аналоговых вычислительных машин в энергетических системах. Методы исследования переходных процессов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1970. 400 с.

5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах. Том 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 532 с.

6. Самойленко В.О., Коркунова О.Л., Паздерин А.В., Новиков Н.Н. Особенности отключения токов коротких замыканий генераторов малой мощности // Релейщик. 2014. №4 (20). С. 26-31.

7. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.

8. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. 496 с.

9. Núñez-Hernández I., Breedveld P., Weustink P., Gonzalez-A G. Phasor Analysis of a Synchronous Generator: A Bond Graph Approach // International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering, Vol. 8, №7, 2014. pp. 1059 - 1065.

10. Медведев М.Ю., Шевченко В.А. Оценка возмущений в процессе автоматического регулирования синхронного генератора // «Инженерный вестник Дона», 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930).

11. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Поляков И.С. Математическое описание алгоритма управления топливоподачей дизель-генераторной электростанции переменной скорости вращения // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1869](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1869).

### References

1. Vagin G.Ya., Loskutov A.B., Solntsev E.B., Voevodin A.G., Sosnina E.N., Mamonov A.M., Petrov A.A. Promyshlennaya energetika. 2010. №7. pp. 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, Vol. 2, 2002. pp. 1357-1362.

3. Sharov Yu.V., Kartashev I.I., Tul'skiy V.N., Shamonov R.G., Vorob'ev A.Yu. Upravlenie kachestvom elektroenergii [Electrical energy quality management]. M.: ID MEI, 2006. 320 p.

4. Gruzdev I.A., Kadomskaya K.P., Kuchumov L.A., Luginskiy Ya.N., Portnoy M.G., Sokolov N.I. Primenenie analogovykh vychislitel'nykh mashin v energeticheskikh sistemakh. Metody issledovaniya perekhodnykh protsessov [The use of analog computers in power systems. Research of electrical transients]. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Energiya, 1970. 400 p.

5. Ivanov-Smolenskiy A.V. Elektricheskie mashiny: uchebnik dlya vuzov [Electrical machines]. V dvukh tomakh. Tom 2. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2006. 532 p.

6. Samoylenko V.O., Korkunova O.L., Pazderin A.V., Novikov N.N. Releyshchik. 2014. №4 (20). pp. 26-31.

7. Kopylov I.P., Klovov B.K., Morozkin V.P., Tokarev B.F. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]. 3-e izd., ispr. i dop. M.: Vysshaya shkola, 2002. 757 p.

8. Chernykh I.V. SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy [SIMULINK: the authoring environment for engineering applications]. M.: DIALOG-MIFI, 2003. 496 p.

9. Núñez-Hernández I., Breedveld P., Weustink P., Gonzalez-A G. Phasor Analysis of a Synchronous Generator: A Bond Graph Approach. International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering, Vol. 8, №7, 2014. pp. 1059-1065.

10. Medvedev M.Yu., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1930).

11. Khvatov O.S., Dar'enkov A.B., Polyakov I.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1869](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1869).