

Для примера был выполнен тепловой расчет серийного АД 4А160S4У3, работающего на заданную вентиляторную нагрузку при переходе со скорости 2020 об/мин на скорость 2300 об/мин, при этом момент сопротивления нагрузки изменился с 50 до 68 Н·м. Двигатель питается от преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией при законе частотного управления $U/f = \text{const}$. Предельное значение частоты преобразователя составляет 100 Гц. На рис.2 представлены временные характеристики скорости двигателя n и превышения температуры обмотки статора Θ_c над температурой окружающей среды, соответствующее вышеуказанному переходу с меньшей скорости на большую.

По окончании переходного процесса потери уменьшаются и скорость нарастания температуры снижается. Программа даст возможность рассчитывать температуры других конструктивных частей машины в динамических режимах. Аналогично можно осуществить тепловой расчет асинхронных двигателей в динамических режимах в системах регулируемых приводов с различными типами частотных преобразователей, видами регулирования и законами управления, характерами и величинами нагрузок и их тахограммами.

1. Счастливы Г.Г. *Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей*. К., 1966.
2. Беспалов В.Я., Дунайкина Е. А., Мощинский Ю. А. *Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах*. М., 1987.
3. Коваль-Лесков А.В. *Тепловые процессы в асинхронном электродвигателе при работе в перемежающемся режиме // Электромашинобудовання та електро-обладнання: Республ. міжвід. наук.-техн. зб. 1997. Вип.49. С.68–73.*

УДК 621.311

Сивокобыленко В.Ф., Меженкова М.А.

Донецкий государственный технический университет, кафедра ЭС

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

© Сивокобыленко В.Ф., Меженкова М.А., 2000

Запропонована методика визначення миттєвих значень струмів та напруг прямої, зворотної, нульової послідовностей, а також аперіодичної складової в фазах як у сталих, так і в перехідних режимах. Методика заснована на об'єднанні методів симетричних складових та розкладання в ряд Фур'є.

Для настройки и анализа работы релейной защиты требуется знание не только мгновенных значений фазных токов и напряжений при коротких замыканиях, но и их симметричных составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей. Эта задача возникает как на стадии проектирования, так и при эксплуатации. Существующие методики

расчета и большинство математических моделей дают возможность определять только сверхпереходные и установившиеся значения указанных величин и не дают возможности рассчитать их мгновенные значения в течение всего переходного процесса.

Эта работа посвящена определению в переходных режимах мгновенных токов и напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей при всех видах симметричных и несимметричных коротких замыканий. В качестве исходных данных используются мгновенные значения фазных токов и напряжений, полученные экспериментально или с помощью математических моделей, основанных на полных дифференциальных уравнениях (ДУ) элементов [1].

Известно, что несинусоидальная периодическая функция в стационарном режиме может быть представлена в виде составляющих ряда Фурье, а несимметричная система трех фазных величин – в виде составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей [2]. Однако в электрических системах переходные процессы, например при КЗ, характеризуются наличием аperiodической и периодической составляющих, непрерывно изменяющих свои параметры (амплитуду, фазу) во времени. Особенностью подхода к решению поставленной в этой работе задачи является объединение метода симметричных составляющих и разложения в ряд Фурье.

В связи с этим на каждом шаге вычислений будет уместным рассмотрение небольшого промежутка времени, равного, например, длительности одного периода T основной частоты $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$, на протяжении которого ток (напряжение) каждой фазы представляются в виде неизменной по амплитуде периодической, включающей прямую, обратную и нулевую последовательности, а также аperiodической (постоянной) составляющих

$$i(t) = i_{per}(t) + i_{aper} = i1(t) + i2(t) + i0(t) + i_{aper}. \quad (1)$$

В пределах принятого периода T расчет указанных составляющих выполняется по следующему алгоритму.

В каждой фазе выделяется аperiodическая (постоянная) составляющая, определяемая как среднее значение n дискретно выделенных величин на периоде

$$i_{aper} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \approx \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n i_s.$$

С учетом (1) периодическую составляющую в каждой фазе, можно найти как разность между мгновенной исходной величиной и аperiodической составляющей

$$i_{per}(t) = i(t) - i_{aper}.$$

Представим теперь периодическую составляющую тока в виде ряда Фурье

$$i_{per}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos k\omega t = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cos(k\omega t - \varphi_k), \quad (2)$$

где k – номер гармоники; B_k и C_k – амплитуды ее синусной и косинусной составляющих

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_{per}(t) \sin k\omega t dt; \quad C_k = \frac{2}{T} \int_0^T i_{per}(t) \cos k\omega t dt.$$

Амплитуду и начальную фазу k -й гармоники находим как

$$I_{mk} = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}; \quad \varphi_k = \arctg(B_k / C_k).$$

При коротких замыканиях в электрических системах токи в фазах, как правило, содержат только затухающую аperiodическую и первую гармоническую составляющие.

Поэтому без ущерба для точности расчетов в пределах одного периода T можно ограничиться в (2) только первой гармонической составляющей и определить для нее B , C , I_m и φ по приближенным формулам

$$B \approx \frac{2}{n} \sum_{s=1}^n i_{per}(T \frac{s}{n}) \sin(T \frac{s}{n}); \quad C \approx \frac{2}{n} \sum_{s=1}^n i_{per}(T \frac{s}{n}) \cos(T \frac{s}{n});$$

$$I_m = \sqrt{B^2 + C^2}; \quad \varphi = |\arctg(B/C)|.$$

Здесь период T делится на n равных интервалов и в каждой точке деления вычисляются ординаты $i(T \frac{s}{n})$, полагая $s=1,2,3...n$. Определение угла φ производится с учетом соотношений

$$\varphi = \varphi, \text{ если } C > 0 \text{ и } B > 0, \quad \varphi = -\varphi, \text{ если } C > 0 \text{ и } B \leq 0, \quad (3)$$

$$\varphi = \pi - \varphi, \text{ если } C \leq 0 \text{ и } B > 0, \quad \varphi = \pi + \varphi, \text{ если } C \leq 0 \text{ и } B \leq 0.$$

Теперь представляется возможным сформировать выражения для мгновенных комплексных значений периодических составляющих фазных токов

$$\underline{i}mgna_s = Ima(\cos(\omega t_s - \varphi_a) + j \sin(\omega t_s - \varphi_a));$$

$$\underline{i}mgnb_s = Imb(\cos(\omega t_s - \varphi_b) + j \sin(\omega t_s - \varphi_b));$$

$$\underline{i}mgnc_s = Imc(\cos(\omega t_s - \varphi_c) + j \sin(\omega t_s - \varphi_c)).$$

Далее определяются комплексные мгновенные значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей в каждой фазе

$$\underline{i}1a_s = \frac{\underline{i}mgna_s + \underline{i}mgnb_s \cdot a + \underline{i}mgnc_s \cdot a^2}{3};$$

$$\underline{i}2a_s = \frac{\underline{i}mgna_s + \underline{i}mgnb_s \cdot a^2 + \underline{i}mgnc_s \cdot a}{3};$$

$$\underline{i}1b_s = \underline{i}1a_s \cdot a^2; \quad \underline{i}2b_s = \underline{i}2a_s \cdot a; \quad (4)$$

$$\underline{i}1c_s = \underline{i}1a_s \cdot a; \quad \underline{i}2c_s = \underline{i}2a_s \cdot a^2;$$

$$\underline{i}0_s = \frac{\underline{i}mgna_s + \underline{i}mgnb_s + \underline{i}mgnc_s}{3},$$

где a, a^2 – операторы изменения аргумента вектора,

$$a = e^{j2\pi/3}, \quad a^2 = e^{-j2\pi/3}.$$

Результатом расчета на рассматриваемом интервале являются мгновенные токи последовательностей в середине периода. Далее осуществляется сдвиг на один шаг по времени и производятся аналогичные вычисления.

Ниже приводится пример расчета мгновенных значений токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, а также апериодической составляющей при заданных мгновенных значениях фазных токов i_a, i_b, i_c блока 300 МВт (токи высокой стороны блочного трансформатора), питающего систему шин 330 кВ при однофазном коротком замыкании на этой системе шин. Фазные токи (рис.1–3) заданы в относительных единицах, приведены к стороне генераторного напряжения 20 кВ.

Рассмотрим первый период от 0 до 0,02 с. Этот интервал разделяют на 20 точек. В каждой из фаз выделяются аperiodические составляющие токов на периоде

$$i_{apera} = \frac{1}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{a_s} = -1.246 \text{ о.е.};$$

$$i_{aperb} = \frac{1}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{b_s} = -0.477 \text{ о.е.};$$

$$i_{aperc} = \frac{1}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{c_s} = -0.563 \text{ о.е.}$$

Определяются периодические составляющие фазных токов

$$i_{peras} = i_{as} - i_{apera};$$

$$i_{perbs} = i_{bs} - i_{aperb};$$

$$i_{percs} = i_{cs} - i_{aperc}.$$

Периодические составляющие представляются в виде ряда Фурье, в котором учитывается только первая гармоника. Определяются комплексные значения токов в фазах a, b, c на рассматриваемом периоде, для чего ток представляется в виде косинусной (вещественной – re) и синусной (мнимой – im) составляющих

$$i_{rea} = \frac{2}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{peras} \cdot \cos \omega t_s = 1.03 \text{ о.е.};$$

$$i_{ima} = \frac{2}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{peras} \cdot \sin \omega t_s = -2.443 \text{ о.е.};$$

$$i_{reb} = \frac{2}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{perbs} \cdot \cos \omega t_s = 1.045 \text{ о.е.};$$

$$i_{ib} = \frac{2}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{perbs} \cdot \sin \omega t_s = -0.898 \text{ о.е.};$$

$$i_{rec} = \frac{2}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{percs} \cdot \cos \omega t_s = 0.429 \text{ о.е.};$$

$$i_{imc} = \frac{2}{20} \cdot \sum_{s=1}^{20} i_{percs} \cdot \sin \omega t_s = -0.451 \text{ о.е.}$$

Амплитуды токов в фазах a, b, c

$$I_{ma} = \sqrt{(i_{rea})^2 + (i_{ima})^2} = 2.651 \text{ о.е.};$$

$$I_{mb} = \sqrt{(i_{reb})^2 + (i_{imb})^2} = 1.378 \text{ о.е.};$$

$$I_{mc} = \sqrt{(i_{rec})^2 + (i_{imc})^2} = 0.622 \text{ о.е.}$$

Фазы токов в координатах a, b, c с учетом (3)

$$\varphi_a = \arctg\left(\frac{i_{ima}}{i_{rea}}\right) = -67.14^\circ = -1.172 \text{ рад};$$

$$\varphi_b = \arctg\left(\frac{i_{imb}}{i_{reb}}\right) = -40.69^\circ = -0.71 \text{ рад};$$

$$\varphi_c = \arctg\left(\frac{i_{mc}}{i_{rc}}\right) = -46.47^\circ = -0.811 \text{ рад.}$$

Мгновенные комплексные значения периодических составляющих фазных токов будут

$$\begin{aligned} i_{mga_s} &= 2.651(\cos(\omega t_s + 1.172) + j \sin(\omega t_s + 1.172)); \\ i_{mgnb_s} &= 1.378(\cos(\omega t_s + 0.71) + j \sin(\omega t_s + 0.71)); \\ i_{mgnc_s} &= 0.622(\cos(\omega t_s + 0.811) + j \sin(\omega t_s + 0.811)). \end{aligned}$$

По (4) находим мгновенные токи прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Результатом приведенного расчета являются мгновенные токи последовательностей i_{10} i_{20} i_{010} в середине периода в момент 0,01 с ($s=10$). Вещественные части этих комплексов равны соответствующим мгновенным фазным токам.

$$\begin{aligned} i_{1a_{10}} &= -0.207; & i_{1b_{10}} &= -0.537; & i_{1c_{10}} &= 0.744; \\ i_{2a_{10}} &= -0.343; & i_{2b_{10}} &= 0.45; & i_{2_{10}} &= -0.107; \\ i_{0_{10}} &= -1.184. \end{aligned}$$

Далее осуществляется сдвиг на один шаг (0,001 с) и рассматривается период времени от 0,001 до 0,021 с, результатом расчета на котором являются мгновенные токи последовательностей в момент 0,011 с, и т.д.

Ниже на рис.1–3 приведены осциллограммы исходных (сплошная линия) и полученных после разложения (пунктир) по выражению (1) токов в фазах a, b, c . Относительная погрешность аппроксимации исходной кривой тока короткого замыкания не превышает 2 %.

На рис.4–6 показаны мгновенные значения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, а на рис.7 – значение аperiodической составляющей тока в фазе a .

$i_a, \text{ o.e.}$

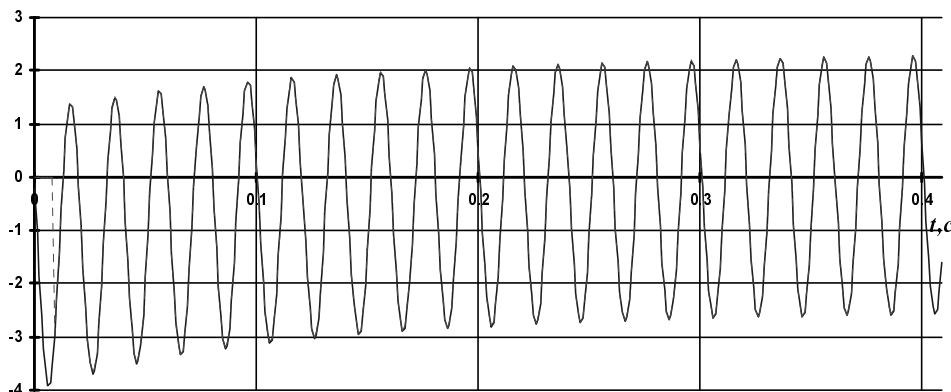


Рис.1. Исходный ток в фазе a и найденный по составляющим.

$i_b, \text{ o.e.}$

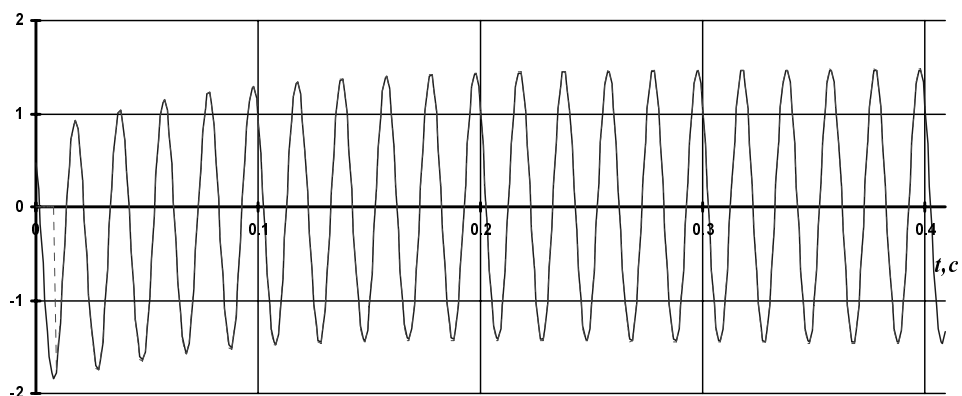


Рис.2. Исходный ток в фазе b и найденный по составляющим.

$i_c, \text{ o.e.}$

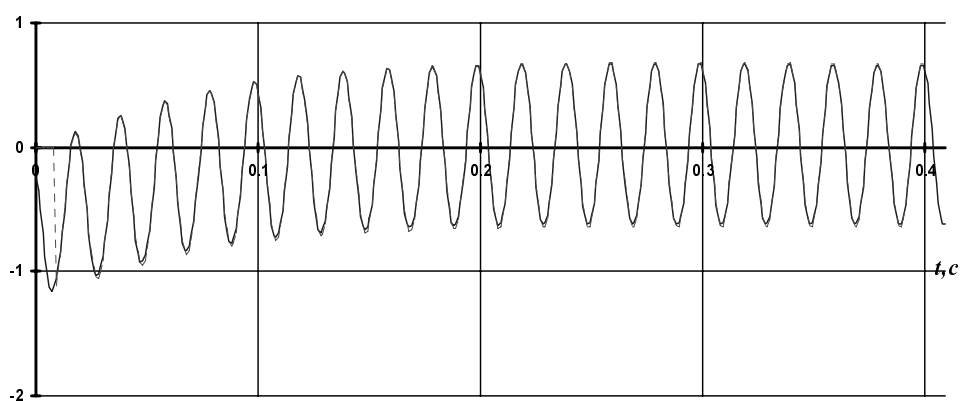


Рис.3. Исходный ток в фазе c и найденный по составляющим.

$i_{1a}, \text{ o.e.}$

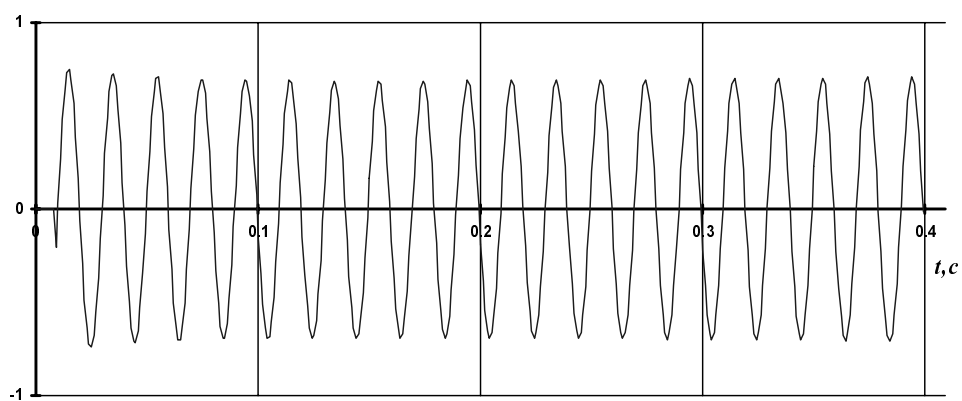


Рис.4. Мгновенное значение тока прямой последовательности в фазе a .

$i_{2a}, \text{ o.e.}$

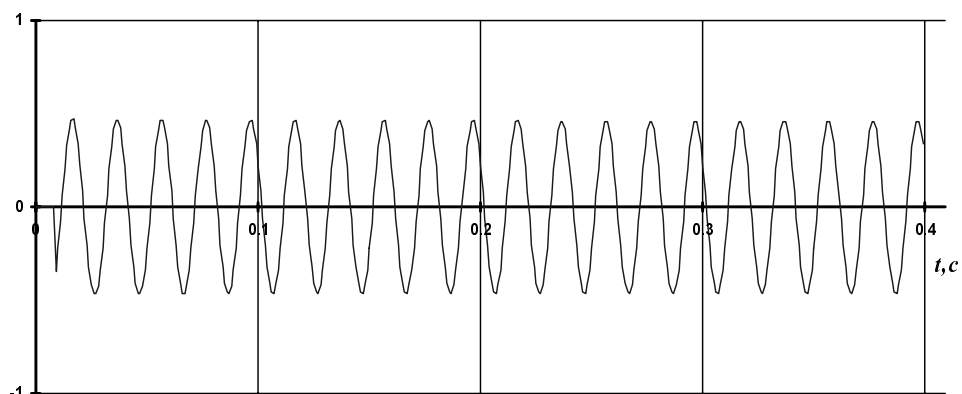


Рис.5. Мгновенное значение тока обратной последовательности в фазе a .

$i_{0a}, \text{ o.e.}$

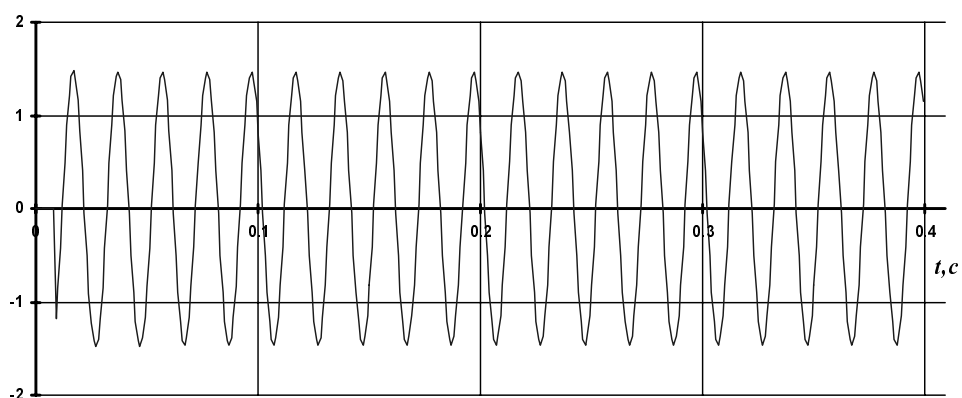


Рис.6. Мгновенное значение тока нулевой последовательности в фазе a .

$i_{\text{апер}a}, \text{ o.e.}$

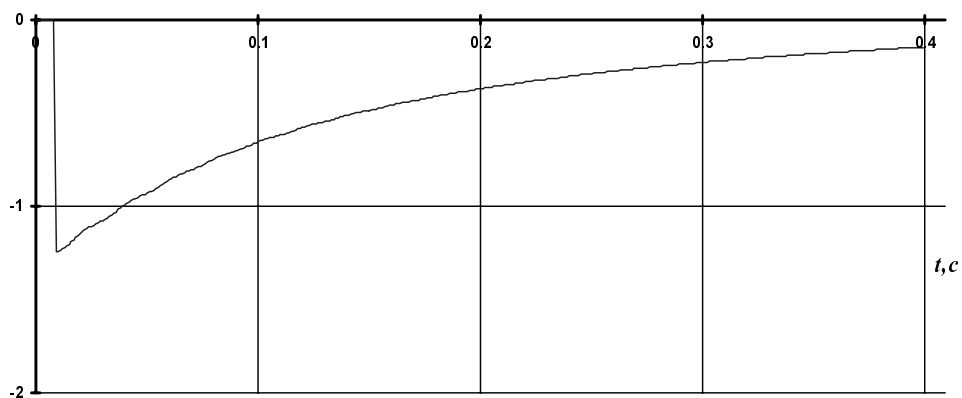


Рис.7. Значение аperiodической составляющей тока в фазе a .

Как видно из рис.1–7, в приведенном примере получены расчетные значения составляющих токов прямой, обратной, нулевой последовательностей, а также апериодической составляющей, начиная с момента времени 0,01 с, т.е. с запаздыванием на половину периода основной частоты. Этот недостаток можно устранить путем экстраполяции указанных составляющих для участка времени от 0 до 0,01 с, используя их известные значения на интервале от 0,01 до 0,02 с.

Полученные данные можно использовать для анализа работы и выбора уставок фильтровых устройств релейной защиты генераторов и автотрансформаторов электростанций.

Выводы

1. Разработана методика представления мгновенных значений фазных токов (напряжений) в виде апериодической составляющей, а также составляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей, основанная на объединении метода симметричных составляющих и разложения в ряд Фурье.

2. Предложенную методику можно применять для определения мгновенных значений симметричных и апериодических составляющих при расчетах с помощью математических моделей, а также используя фазные величины, зарегистрированные с помощью аварийных осциллографов электрической системы, что даст возможность выполнять более качественный анализ работы силового оборудования и фильтровых устройств релейной защиты и автоматики.

1. Сивокобыленко В.Ф., Меженкова М.А. Математическая модель электрической станции для анализа поведения турбогенераторов с системами самовозбуждения при коротких замыканиях // Технічна електродинаміка: Спец. вип. за матеріалами II Міжнар. наук.-техн. конф. "Математичне моделювання в електротехніці та електроенергетиці". К., 1998. 2. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 1. / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г.Герасимова и др. 7-е изд. М., 1985.