

**В.И. МИЛЫХ**, д-р техн. наук,  
**В.А. БАДОВСКИЙ**, аспирант

## ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Численно-пользовими розрахунками магнітного поля у режимі навантаження турбогенератора зроблено порівняльну оцінку, наскільки адекватно відображають його електромагнітний стан у цьому режимі класичні векторні діаграми Блонделя та Пот'є.

Численно полевыми расчетами магнитного поля в режиме нагрузки турбогенератора сделана сравнительная оценка, насколько адекватно отображают его электромагнитное состояние в этом режиме классические векторные диаграммы Блонделя и Пот'є.

При анализе состояния и проектировании турбогенераторов (ТГ) классическими методами является общепринятым и эффективным использование векторных диаграмм (ВД), связывающих электрические и магнитные величины [1, 2]. Разнообразие ВД порождено стремлением адекватного отображения реального электромагнитного состояния ТГ в режиме нагрузки.

Чтобы отдать предпочтение конкретной диаграмме, необходимы критерии достоверности. Ими могли бы стать данные экспериментальных исследований. Однако в условиях производства мощных ТГ полномасштабный эксперимент в режиме нагрузки не представляется возможным. Приходится ограничиваться частными экспериментами в режимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Однако экстраполяция данных этих экспериментов на режим нагрузки, как и сами ВД, сопряжены с целым рядом допущений и, следовательно, имеют ограниченную точность.

С развитием численных методов расчета электромагнитных полей [3] появились программные инструменты, например, [4], позволяющие наиболее точно определить расчетным путем состояние ТГ в режиме нагрузки и, следовательно, оценить различные варианты ВД. Вместе с тем, ВД можно использовать для предварительного задания величин и фазовых параметров токов обмоток ТГ [5]. И здесь также важен правильный выбор ВД с точки зрения минимума затрат на ее подготовку и последующее приближение полевого расчета к точному отображению заданного режима нагрузки ТГ.

Целью данной работы является сравнительная оценка эффективности наиболее распространенных вариантов ВД – ВД Блонделя и Пот'є [1, 2] посредством численно-полевых расчетов параметров ТГ в режиме нагрузки.

Для выполнения демонстрационных расчетов был выбран уже известный по [6] ТГ мощностью 320 МВт с номинальными фазным напряжением  $U_{sN} = 11547$  В и коэффициентом мощности  $\cos \varphi_N = 0,85$ .

При построении диаграммы Блонделя необходимо знать следующие но-

минальные данные ТГ: номинальный фазный ток статора  $I_{sN} = 10868$  А, номинальное фазное напряжение статора и коэффициент мощности. Кроме этих данных необходимо иметь синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора  $x_c$  и ненасыщенную характеристику холостого хода (НХХХ), которые были рассчитаны с использованием метода конечных элементов, по программе FEMM.

Магнитное поле в поперечном сечении ТГ (рис.1) описывается дифференциальным уравнением

где  $A_z$ ,  $J_z$  – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока;  $\nu$  – удельное магнитное сопротивление;  $\vec{k}$  – орт. На внешней границе области расчета для ВМП принято условие Дирихле

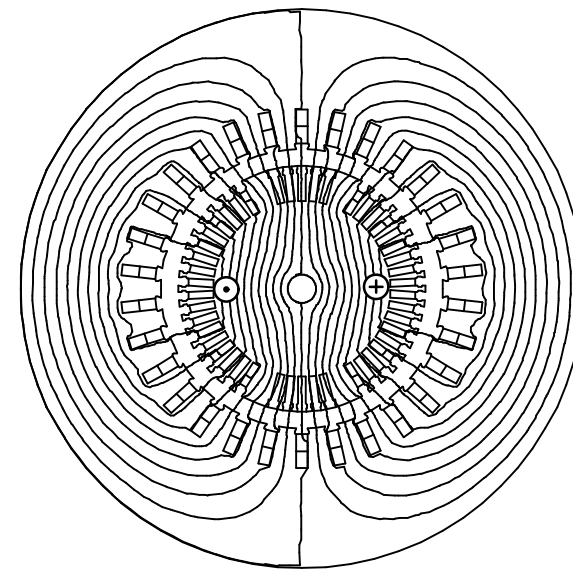


Рис. 1. Расчетная модель ТГ с картиной магнитного поля в режиме холостого хода

$$A_z = 0, \quad (2)$$

которым фактически ограничивается дальнейшее проникновение магнитного поля.

При расчете НХХХ в пазах ротора задали ток  $I_f = 1000$  А, заведомо во много раз меньше номинального, и произвели расчет. В результате получили распределение векторного магнитного потенциала  $A_z$  и по нему программными средствами FEMM нашли магнитное потокоцепление для одной фазы обмотки статора

$$\Psi_A = \frac{w_s l_a}{S_A} \oint_{S_A} A_z dS, \quad (3)$$

которое получается интегрированием по общей площади поперечного сечения  $S_A$  сторон ее секций,  $w_s = 10$  число витков на фазу обмотки статора. Эта фазная обмотка должна находиться по отношению к ротору в положении, обеспе-

чивающем максимальное магнитное потокоцепление (МПС)  $\Psi_{mA}$ . Далее по формуле

$$E_{Af} = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot \Psi_{mA}, \quad (4)$$

где частота  $f = 50$  Гц, определили ЭДС, которая индуцируется при МПС

$\Psi_{mA} = 7,5$  Вб,  $E_{Af} = 1670$  В. Полученных данных достаточно чтобы построить НХХХ, поскольку она имеет прямолинейный характер и строится из начала координат. На рис. 2 приведена НХХХ в относительных единицах. За базовые значения приняты номинальное напряжение и соответствующий этому напряжению по НХХХ ток возбуждения  $I_f = 6935$  А.

Чтобы найти синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора, соответствующее рабочему режиму, использовали методику, описанную в [7]. Расчет вели при отсутствии тока в роторе, но при таком значении МПС  $\Psi_{mA}$  фазной обмотки, при котором по формуле (4) получается ЭДС, равная  $U_{sN}$ .

Для создания указанного МПС  $\Psi_{mA}$  было подобрано амплитудное значение тока статора  $I_m = 7283,2$  А, и по формулам:

$$i_A = I_m \cos(\omega t - \beta); i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \beta);$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \beta) \quad (5)$$

рассчитаны необходимые фазные токи обмоток статора.  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота; момент времени  $t = 0$ ; угол сдвига осей намагничивания обмотки ротора и обмотки статора  $\beta = 0$ . После чего провели расчет индуктивности фазы  $L_a = \Psi_{mA}/I_m$  и синхронного индуктивного сопротивления обмотки статора

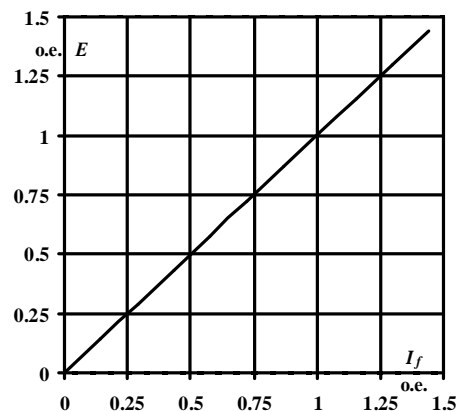


Рис. 2. Ненасыщенная характеристика холостого хода

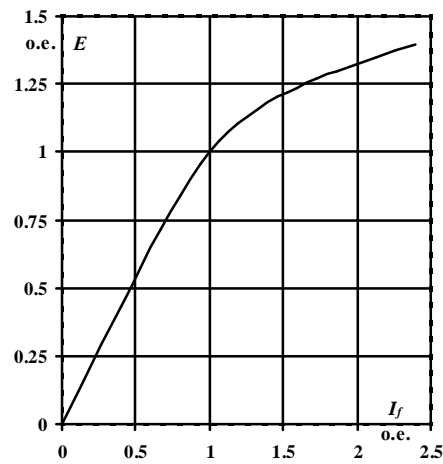


Рис. 3. Характеристика холостого хода

$$x_c = 2\pi f L_a / Z_{\delta az}, \quad \text{где}$$

$$Z_{\delta az} = U_{sN} / I_{sN} = 1,064 \text{ Ом.}$$

В результате получили  $x_c = 2,115$  о.е. Следует отметить, что данный расчет не затрагивает лобовые части, поэтому и в полученное  $x_c$  не входит индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей обмотки, которое согласно классической методике не превышает 3% от  $x_c$ .

После предварительных расчетов была построена диаграмма Blondеля в относительных единицах, которая приведена на рис. 3.  $E_f$  – ЭДС индуцируемая током возбуждения  $I_f$ ;  $I'_{fk}$  – ток возбуждения соответствующий установившемуся трехфазному короткому замыканию;  $I_{\Sigma}$  – ток возбуждения холостого хода. Из диаграммы были извлечены значение тока возбуждения:  $I_f = 19240$  А и угла нагрузки  $\Theta = 40,37^\circ$ , которые должны соответствовать номинальному режиму работы ТГ.

Чтобы это проверить, по программе FEMM был рассчитан режим номинальной нагрузки. Для этого был рассчитан угол сдвига осей намагничивания обмотки ротора и обмотки статора [5]:

$$\beta = \varphi + \Theta + 90 = 162,16^\circ.$$

По (5) были рассчитаны мгновенные значения фазных токов для номинального тока статора, т.е. для  $I_m = \sqrt{2} \times I_{sN} = 15370$  А. В результате численного расчета режима нагрузки ТГ были определены значения напряжения генератора  $U_s = 9514$  В, и угла сдвига фаз  $\varphi = 30,81^\circ$ , которые существенно отличаются от номинальных. Было проведено еще ряд аналогичных расчетов. На каждом шаге постепенно изменяли угол  $\beta$  и ток возбуждения. В итоге при токе возбуждения  $I_f = 21350$  А и  $\beta = 157,7^\circ$  удалось существенно приблизиться к номинальным напряжению и углу сдвига фаз.

На следующем этапе проводилось построение диаграммы Потье. Для ее построения потребовались те же номинальные данные, что и для диаграммы Blondеля. Кроме этого по программе FEMM была рассчитана характеристика

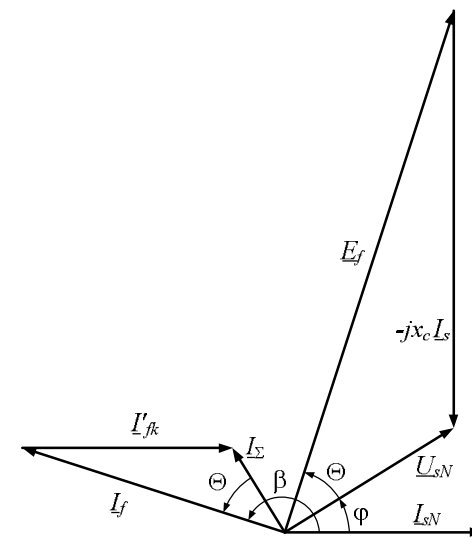


Рис. 4. Диаграмма Blondеля для ТГ

холостого хода (ХХХ) [8]. Для этого провели ряд расчетов при отсутствии тока в обмотке статора. Последовательно задавали значения тока возбуждения, программными средствами ФЕММ находили магнитное потокоцепление (МПС)  $\Psi_m$  для одной фазы обмотки статора, расположенной в позиции, обеспечивающей максимальное МПС, и по формуле (4) находили ЭДС. Расчет завершили, когда ЭДС превысила номинальное фазное напряжение в 1,3 раза. На рис. 3 приведена ХХХ в относительных единицах. За базовые значения приняты номинальное напряжение и соответствующий этому напряжению по ХХХ ток возбуждения  $I_f = 7519,2 \text{ А}$ . Из классического расчета были взяты ток реакции якоря, приведенный к обмотке ротора  $I'_a = 2,0611 \text{ о.е.}$ , и индуктивное сопротивление рассеяния якоря  $x_\sigma = 0,1491 \text{ о.е.}$ , причем без учета лобового рассеяния, поскольку и при численно-полевым расчете синхронного индуктивного сопротивления обмотки статора индуктивное сопротивление рассеяния лобовых частей обмотки статора не учитывалось.

Диаграмма Потье для ТГ приведена на рис. 4.  $E_\delta$  – Э.Д.С в фазе обмотки якоря от результирующего потока в зазоре, с учетом реакции якоря;  $I_\delta$  – ток возбуждения необходимый для создания  $E_\delta$ . Из диаграммы были извлечены значение тока возбуждения  $I_f = 20820 \text{ А}$  и угла нагрузки  $\Theta = 39,2^\circ$ , которые должны соответствовать номинальному режиму работы. Чтобы это проверить, по программе ФЕММ был рассчитан режим номинальной нагрузки. Для этого был рассчитан угол сдвига осей намагничивания обмотки ротора и обмотки статора [5]:  $\beta = \varphi + \Theta + 90 = 160,99^\circ$ .

По (5) были рассчитаны мгновенные значения фазных токов для номинального тока статора т.е. для  $I_m = \sqrt{2} \times I_{sN} = 15370 \text{ А}$ . В результате были определены значения напряжения генератора  $U_s = 10790 \text{ В}$ , и угла сдвига фаз  $\varphi = 36,12^\circ$ , которые существенно отличаются от номинальных.

Таблица 1 – Сравнение расчетных параметров турбогенератора

Вариант расчета	$\Theta$ , градус	$I_f$ , А	$U_s$ , В	$\varphi$ , градус	$P$ , МВт
По ВД Blondеля	40,37	19240	9514	30,81	266
По ВД Потье	39,2	20820	10790	36,12	284
Полевой расчет	35,91	21350	11547	31,8	320

**Вывод.** Классические векторные диаграммы Blondеля и Потье наглядно отображают соотношения между электрическими и магнитными величинами в электрической машине. Однако представленные расчеты показали, что, если для численно-полевого расчета режима номинальной нагрузки ТГ принимать ток возбуждения и угол  $\Theta$ , полученные из диаграмм Blondеля или Потье, то найденные напряжение, угол  $\varphi$  и мощность ТГ существенно отличаются от ожидаемых номинальных. Как видно из табл.1, параметры ТГ полученные на основе данных диаграммы Потье, ближе к номинальным, активная мощность ТГ получилась меньше номинальной на 11,3 %, а при расчете по диаграмме Blondеля на 16,9 %. Это объясняется тем, что при построении последней использовалась НХХХ. Поэтому в подобных расчетах целесообразно использовать диаграмму Потье.

**Список литературы:** 1. *Вольдек А.И.* Электрические машины. – Л.: Энергия, – 1978. – 832 с. 2. *Титов В.В., Хторецкий Г.М.* и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с. 3. *Мильх В.И., Полякова Н.В.* Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – №2. – С.40-46. 4. *Meeker D.* Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003. 5. *Мильх В.И., Полякова Н.В.* Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2003. – №4. – С.59-64. 6. *Мильх В.И., Бадковский В.А.* Сравнительный анализ магнитного поля в турбогенераторе мощностью 320 МВт. // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. науч. трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – №35. – С. 74-78. 7. *Мильх В.И., Полякова Н.В.* Численно-полевым анализ индуктивных сопротивлений рассеяния турбогенератора. // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. науч. трудов. Тематический выпуск. Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2005. – №36. – С.39-46. 8. *Мильх В.И., Майстренко А.М., Бадковский В.А.* Численно-полевым анализ режимов холостого хода и короткого замыкания турбогенератора. // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. науч. трудов. Тематический выпуск. Электроэнергетика и преобразовательная техника. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2005. – №35. – С.113-116.

Поступила в редколлегию 31.04.08

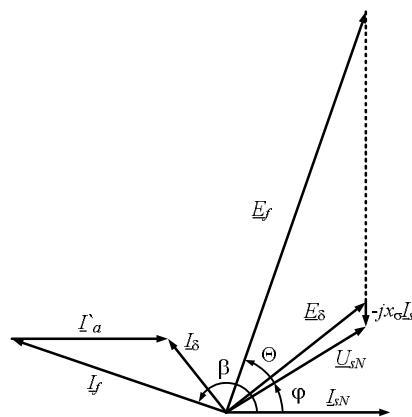


Рис. 5. Диаграмма Потье для ТГ