

Параметры и характеристики вентильных индукторных генераторов

СУГРОБОВ А.М., РУСАКОВ А.М., КАЗИМИРОВ Е.О., ОКУНЕЕВА Н.А., СОЛОМИН А.Н.

Приведено расчетно-теоретическое исследование индукторных генераторов. Результаты исследования расширяют теоретическую базу, на которой построены применяемые методики их проектирования. Теория дополнена конкретными сведениями о характере изменения магнитных потоков в рассматриваемых машинах в функции координат точек внешней и токоскоростной характеристик. Учитываются также закономерности изменения в функции нагрузки коэффициентов использования магнитного потока, определенных по его первым гармоническим и по глубине модуляции кривой его изменения в зависимости от угла поворота ротора. Определены предельные по условию реализации в индукторных генераторах электромагнитные нагрузки, приведены численные значения некоторых параметров, важных с точки зрения получения достоверных конечных результатов проектирования.

Ключевые слова: индукторный генератор, электромагнитные нагрузки, магнитный поток, параметры генератора, методики проектирования

При разработке методик проектных расчётов электрических машин, выборе их условно независимых параметров, компенсирующих недостающие уравнения взаимосвязи между электрическими и магнитными величинами, а также при анализе полученных результатов необходимо иметь чёткие представления о влиянии этих подлежащих выбору параметров на рабочие характеристики генераторов. Речь идёт прежде всего об электромагнитных нагрузках, так как в основном именно от выбора их значений зависит форма рабочих характеристик и расположение на них точки номинального (расчётного) режима. Применительно к этому режиму выбираются значения линейной нагрузки A и магнитной индукции B_d в воздушном зазоре или в зубцах статора B_{zc} в зависимости от типа обмотки проектируемого генератора – распределённой по пазам или сосредоточенной на отдельных зубцах якоря.

Наибольший интерес для разработчиков вентильных индукторных генераторов могут представить зависимости, не получившие отражения в доступной для ознакомления литературе, но имеющие важное значение для совершенствования существующих методик их проектного расчёта и дополнения данными, позволяющими более обоснованно и целенаправленно выбирать электромагнитные нагрузки в соответствии с поставленными при проектировании задачами. В данном случае имеется в виду характер изменения максимального и минимального значений магнитного потока (магнитной индукции) в зубцах и соотношения между электромагнитными нагрузками (A/B_d или A/B_{zc}) в функции нагрузки в точках внешних характеристик и в функции частоты вращения в точках токоскоростной характеристики, а также зависимости от нагрузки используемых при проектировании ин-

дукторных машин коэффициентов использования магнитного потока. Коэффициенты учитывают главную особенность индукторных машин – наличие в их магнитной цепи (воздушном зазоре, зубцах статора и ротора и других участках) постоянной составляющей магнитного потока, которая при воздействии на основное поле машины МДС якоря становится причиной уменьшения максимального значения магнитного потока в зубцах статора $F_{zc\max}$ и возрастания его минимального значения $F_{zc\min}$. В результате уменьшаются глубина модуляции этого потока ($F_{zc\max} - F_{zc\min}$), его первая гармоническая F_{zcl} и, как следствие, коэффициенты использования магнитного потока:

$$k_{ис1} = \frac{F_{zcl}}{F_{zc\max}}; k_{ис} = \frac{F_{zc\max} - F_{zc\min}}{F_{zc\max}}. \quad (1)$$

При отсутствии высших гармоник в кривых изменения магнитного потока в зубцах приведённые выражения равнозначны. Первое из них используется при проектировании индукторных генераторов, исходя из первых гармонических их электрических и магнитных параметров, а второе – исходя из действующих их значений.

Представление о характере изменения максимального и минимального значений магнитного потока в зубцах вентильных индукторных генераторов, коэффициентов использования магнитного потока $k_{ис}$ и $k_{ис1}$, а также отношения линейной нагрузки к максимальному значению магнитной индукции в зубцах $A/B_{zc\max}$ (в ходе дальнейшего изложения символ «max» при B_{zc} опущен) в зависимости от положения рабочей точки на внешних $U_d(I_d)$ и $U_\phi(I_\phi)$ и токоскоростной $I_d(n)$ характеристиках можно получить на примере двухпакетного вентильного индукторного генератора. Его

внешние (при $n = 5 \times 10^3, 1 \times 10^4$ и 15×10^3 об/мин) и токоскоростная характеристики приведены соответственно на рис. 1 и 2, и 7.

Технические данные генератора:

| | |
|--------------------------------------|-----|
| число фаз m | 3 |
| число пакетов статора | 2 |
| число зубцов ротора z_p | 8 |
| число зубцов статора z_c | 18 |
| наружный диаметр корпуса статора, мм | 255 |
| диаметр ротора, мм | 179 |
| длина воздушного зазора, мм | 0,5 |
| длина одного пакета статора, мм | 32 |
| ширина зубца статора, мм | 23 |
| ширина зубца ротора, мм | 28 |
| число витков фазной катушки якоря | 2 |
| число витков обмотки возбуждения | 240 |
| ток возбуждения, А | 10 |

Перечисленные выше зависимости, полученные по результатам расчётов координат внешних и токоскоростной характеристик, приведены на рис. 3–10. Кроме них, приведены также кривые, характеризующие изменение коэффициентов выпрямле-

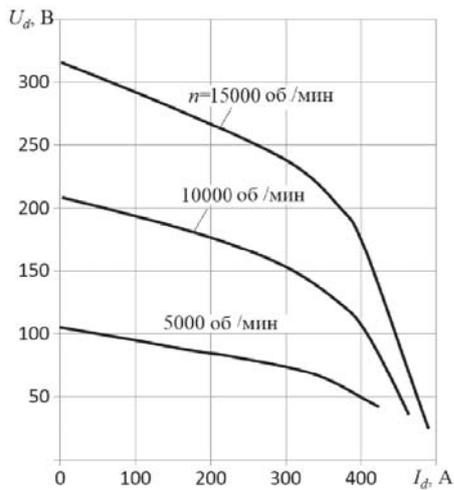


Рис. 1. Внешние характеристики генератора на выходе выпрямительного моста

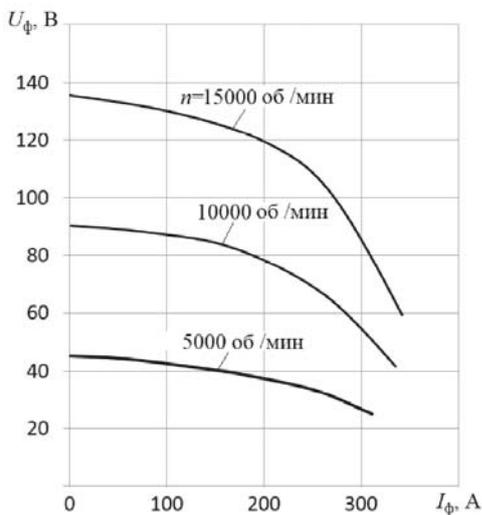


Рис. 2. Внешние характеристики генератора на входе измерительного моста

ния по напряжению $k_U = U_d / U_\phi$ и току $k_I = I_\phi / I_d$ от действующего значения тока в фазе I_ϕ .

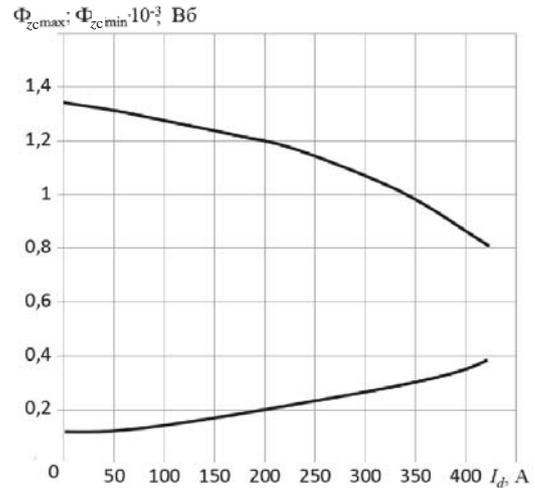


Рис. 3. Зависимость максимального и минимального значений магнитного потока в зубцах статора от действующего значения тока в фазе в точках внешней характеристики $U_d(I_d)$

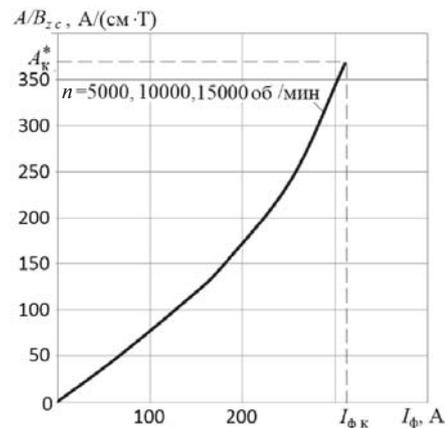


Рис. 4. Зависимость соотношения между электромагнитными нагрузками A/B от действующего значения тока в фазе в точках внешней характеристики $U_\phi(I_\phi)$

Наибольший интерес для разработчиков индукторных генераторов представляют зависимости от нагрузки максимального и минимального значений магнитного потока в зубцах статора F_{zcmax} и F_{zcmin} . По мере возрастания тока I_d разница между максимальным и минимальным значениями магнитного потока в зубцах статора уменьшается (рис. 3) при одновременном возрастании отношения A/B_{zc} (рис. 4). При максимальном значении этого отношения, равном $A/B_{zc} = A_k^* = 375$ А/м (при $n = 5 \times 10^3$ об/мин) и достигаемом рассматриваемым генератором при коротком замыкании, разница между максимальным и минимальным значениями магнитного потока в зубцах статора становится минимальной. Минимального значения достигает и первая гармоническая магнитного потока в зубцах и потокосцепления обмотки якоря.

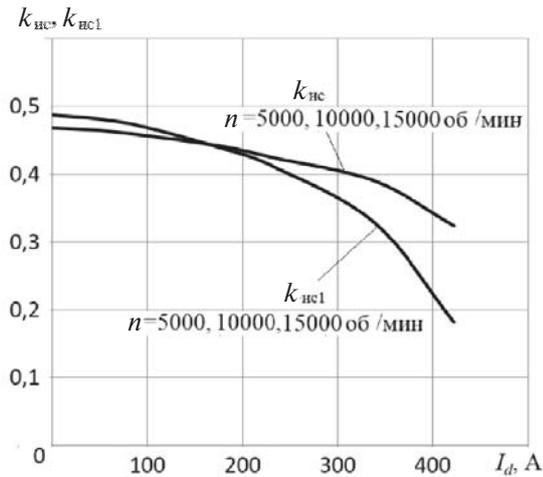


Рис. 5. Зависимости коэффициентов использования магнитного потока $k_{ис}$ и $k_{ис1}$ от средневыврявленного значения тока в точках внешней характеристики $U_d(I_d)$

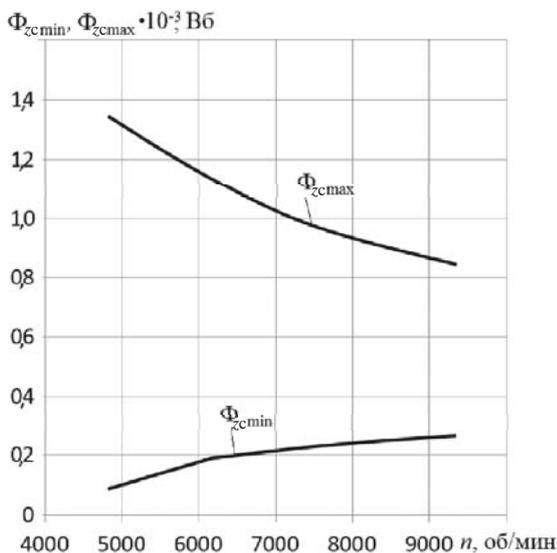


Рис. 6. Зависимость максимального и минимального значений магнитного потока в зубцах статора от частоты вращения вала генератора в точках его токоскоростной характеристики

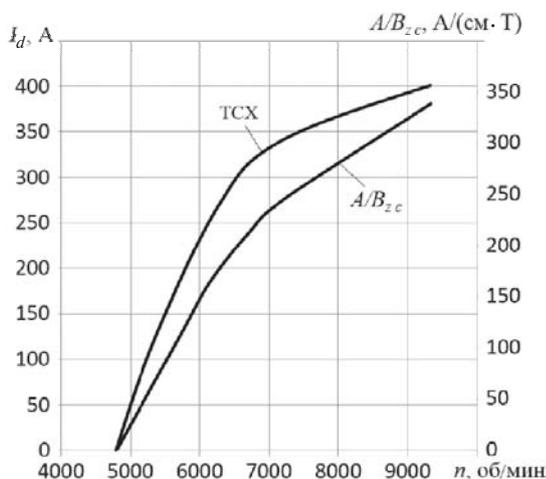


Рис. 7. Токоскоростная характеристика генератора и зависимость соотношения между электромагнитными нагрузками A/B_{zc} от частоты вращения вала генератора в ее точках

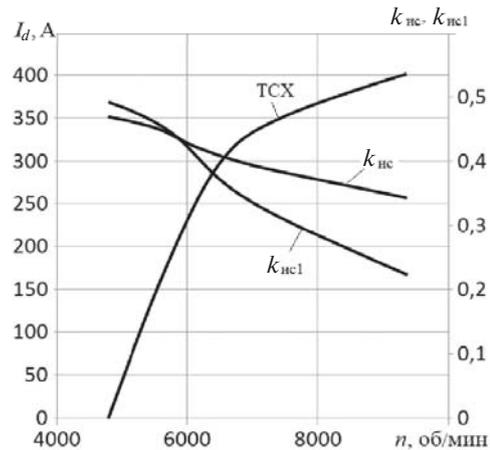


Рис. 8. Токоскоростная характеристика генератора и зависимости коэффициентов использования магнитного потока $k_{ис}$ и $k_{ис1}$ от частоты вращения вала генератора в ее точках

Очевидно, теоретически значение A_K^* не является предельным для отношения A/B_{zc} данного генератора. Если каким-либо способом уменьшить активное сопротивление обмоток (с использованием, например, явления сверхпроводимости), то значение A_K^* увеличится за счёт возрастания тока короткого замыкания и уменьшения максимального значения магнитного потока в зубцах статора F_{zcmax} . Возможность воздействия на составляющие индуктивного сопротивления обмоток приводит к еще большему росту значения A_K^* . Предельного значения этот параметр, характеризующий режим короткого замыкания генератора, достигает при равенстве максимального значения магнитного потока в зубцах минимальному его значению или, что то же, равенстве нулю переменной составляющей магнитного потока в зубцах и ЭДС в обмотках якоря. Наличие тока в обмотке при отсутствии ЭДС может быть только при равенстве нулю активного и индуктивного сопротивлений обмотки, именно поэтому соответствующее этому случаю отношение A/B_{zcmax} и следует рассматривать как предельное или критическое значение для каждой конкретной конструкции индукторных генераторов. Согласно [1]

$$A_{кр}^* = 2\sqrt{2}mqk_c c / g_0 = \sqrt{2} \frac{z_c}{z_p} k_c c / g_0; \quad (2)$$

$$g_0 = \frac{4m_0}{a_p} \frac{l_{max} l_{min}}{l_{max} - l_{min}}$$

Символами m , q , z_c , z_p , a_p , l_{max} и l_{min} в (2) обозначены, соответственно, число фаз, число пазов на полюс и фазу, числа зубцов статора и ротора, коэффициент полюсного перекрытия ротора и максимальное и минимальное значения удельной

магнитной проводимости воздушного зазора на длине зубцового деления статора;

$$l_{\max} = L_{\max} / \mu_0 l_i; \quad l_{\min} = L_{\min} / \mu_0 l_i, \quad (3)$$

где L_{\max} , L_{\min} - максимальное и минимальное значение проводимости воздушного зазора на длине зубцового деления статора.

Согласно изложенному область реальных значений электромагнитных нагрузок, которые могут быть реализованы в индукторных генераторах, ограничена критическим соотношением между линейной нагрузкой и максимальным значением магнитной индукции в зубцах статора $A / B_{zc\max} = A_{кр}^*$.

Как следует из (2), $A_{кр}^*$ зависит от геометрии зубцовой зоны и соотношения между числами зубцов статора и ротора. Если не учитывать этого обстоятельства при проектировании индукторных генераторов (выборе электромагнитных нагрузок), то не исключена вероятность того, что отношение выбранных A и B_{zc} может оказаться в диапазоне значений A^* , ограниченном с одной стороны $A_{кр}$, а с другой $A_{кр}^*$, и по этой причине не смогут быть реализованы в проектируемом генераторе. Для того чтобы этого избежать, необходимо при определении главных размеров генератора (диаметра ротора D и длины его активной части l_i) использовать формулу

$$D^2 l_i = \frac{6,1 P_9}{AB_{zc} n a_p k_{\phi E} k_c k_o k_{ис} c}, \quad (4)$$

где P_9 - действующее значение электромагнитной мощности, на которую проектируется генератор; n - частота вращения вала машины; a_p - конструктивный коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению ширины зубца ротора b_{zp} к полюсному делению $t = pD / 2z_p$; $k_{\phi E}$ - коэффициент формы кривой ЭДС, равный отношению действующего к среднему значению индуцируемой в обмотке якоря ЭДС (в выполненных индукторных генераторах $k_{\phi E} = 1,08, 1,14$); k_c - коэффициент заполнения пакета статора сталью; $c = b_{zc} / b_{zp}$; k_o - обмоточный коэффициент; $k_{ис}$ - коэффициент использования магнитного потока, определённый по глубине модуляции магнитного потока;

$$k_{ис} = k_{ис0} (1 - A^* / A_{кр}^*), \quad (5)$$

где $k_{ис0}$ - значение этого коэффициента в режиме холостого хода.

Как видно из (5), при $A^* \rightarrow A_{кр}^*$ коэффициент $k_{ис} \rightarrow 0$, поэтому реализовать по (4) электромагнит-

ные нагрузки генератора не представляется возможным.

Потокоцепление рассматриваемого генератора практически во всём диапазоне нагрузок несинусоидально, и значения коэффициентов $k_{ис}$ и $k_{ис1}$ отличаются друг от друга (рис. 5), причём разница между ними особенно заметна в области нагрузок, близких к току короткого замыкания. Это обстоятельство создаёт затруднения при определении объёма расточки ротора и его главных размеров (D и l_i), поскольку невозможно вычислить значение $k_{ис1}$, необходимое для обеспечения требуемой мощности, а использование в данном случае его значения при работе индукторного генератора в режиме холостого хода, как это сделано, например, в [2, 3 и др.], приводит к непредсказуемым ошибкам при определении главных размеров. Единственный выход из этого положения - подставить в формулу для определения $D^2 l_i$ значение коэффициента $k_{ис}$, определённое по глубине его модуляции. При этом применительно к генераторам, проектируемым с возможностью полутора- или двукратной перегрузки (например, авиационным), разница в значениях $D^2 l_i$, определённых с использованием $k_{ис}$ или $k_{ис1}$, может быть невелика, а в частных случаях её вообще может не быть, так как коэффициенты могут оказаться равными.

Характер изменения магнитных потоков и соотношения между электромагнитными нагрузками в зависимости от частоты вращения (с учетом положения на них рабочих точек) (рис. 4, 6, 8) аналогичен рассмотренному выше изменению их в функции нагрузки и не требует специальных пояснений. Кривые изменения коэффициента несинусоидальности тока в функции нагрузки и коэффициента выпрямления напряжения (рис. 9, 10) приведены для демонстрации возможного диапазона их изменения в индукторных машинах.

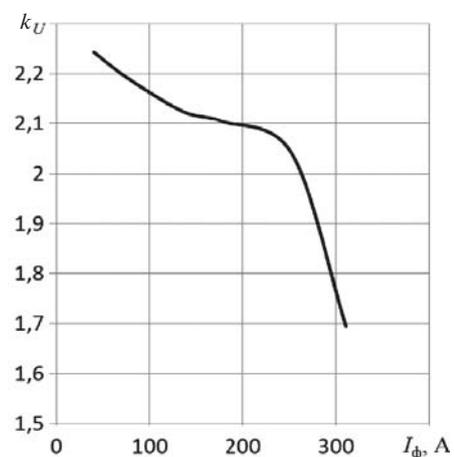


Рис. 9. Зависимость коэффициента выпрямления по напряжению от нагрузки

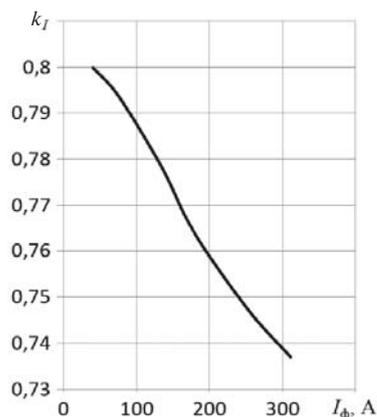


Рис. 10. Зависимость коэффициента выпрямления по току от нагрузки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сугробов А.М., Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012, с. 304.
2. Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы. — М.: Энергия, 1970, с. 192.
3. Домбур Л.Э. Аксиальные индукторные машины. — Рига.: Зинатне, 1984, с. 247.

[30.09.15]

Авторы: Сугробов Анатолий Михайлович окончил электромеханический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1964 г. В 1973 г. защитил кандидатскую диссертацию «Ис-

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 3, pp. 33–37.

следование и разработка разноименнополюсных индукторных генераторов». Профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Русаков Анатолий Михайлович окончил электромеханический факультет МЭИ в 1976 г. В 1982 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка вентильных электродвигателей на базе магнитных систем индукторных машин». Ведущий научный сотрудник кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Казимиров Евгений Олегович окончил институт электротехники МЭИ в 2013 г. Аспирант кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Окунеева Надежда Анатольевна окончила электромеханический факультет МЭИ в 2005 г. В 2008 г. защитила кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование электропривода нефтедобывающих насосов с погружным магнитоэлектрическим двигателем». Ведущий инженер кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Соломин Александр Николаевич окончил электромеханический факультет МЭИ в 1993 г. В 1996 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка математической модели машинно-вентильного преобразователя на базе многофазной индукторной машины с аксиальным потоком». Доцент кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» МЭИ.

Parameters and Characteristics of Converter-Fed Inductor Generators

SUGROBOV Anatolii Mikhailovich (*The National and Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Moscow, Russia*) — Professor, Cand. Sci. (Eng.)

RUSAKOV Anatolii Mikhailovich (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Leading Scientific Researcher, Cand. Sci. (Eng.)

KAZIMIROV Evgenii Olegovich (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Ph. D. Student

OKUNEYEVA Nadezhda Anatol'yevna (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Leading Engineer, Cand. Sci. (Eng.)

SOLOMIN Aleksandr Nikolayevich (*NRU «MPEI», Moscow, Russia*) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

A computation and theoretical investigation of inductor generators is presented. The obtained study results extend the theoretical background based on which the procedures used for designing such generators are constructed. The theory is supplemented with particular data on the manner in which the magnetic fluxes vary in these machines as a function of the coordinates of points on the external and current-speed characteristics. The performed study also takes into account regularities pertinent to variation, as a function of load, of the magnetic flux utilization factors determined from its fundamental harmonic components and from the modulation depth of its variation as a function of the rotor turning angle. The ultimate electromagnetic loads achieved according to the conditions of reaching them in inductor generators are determined. Numerical values of certain parameters important from the viewpoint of obtaining valid final results of designing are given.

Key words: inductor generator, electromagnetic loads, magnetic flux, generator parameters, design techniques

REFERENCES

1. Sugrobov A.M., Rusakov A.M. *Proektirovaniye elektricheskikh mashin avtonomykh ob'ektov* (Designing electrical machines of independent objects). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2012, 304 p.

2. Al'per N.Ya., Terzyan A.A. *Induktornye generatory* (Inductor generators). Moscow, Publ. «Energiya», 1970, 192 p.

3. Dombur L.E. *Aksial'nye induktornye mashiny* (Axial inductor machines). Riga, Publ. «Zinatne», 1984, 247 p.

