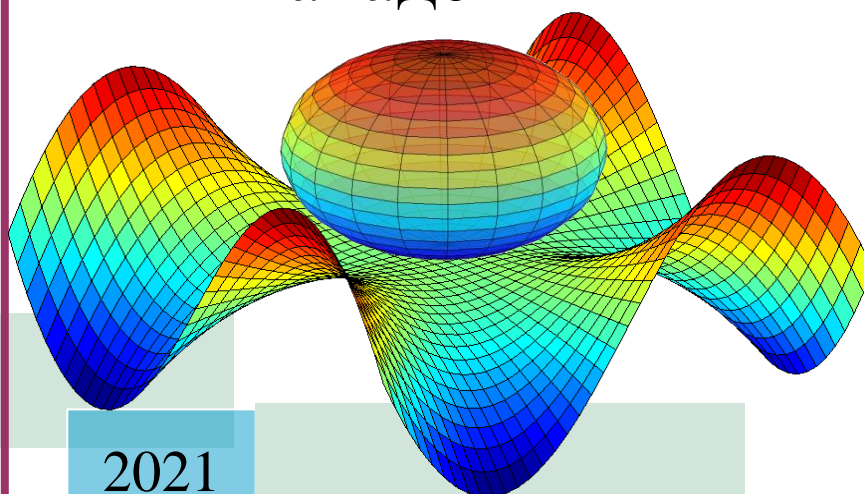


Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

ИЗВЕСТИЯ

Северо-Кавказской
государственной
академии



2021

№ 3

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор Джендубаев А.-З.Р.

Секция гуманитарных и экологических наук

Айбазова М.Ю. – председатель секции, Дармилова Э.Н., Даурова А.Б.,
Нагорная Г.Ю., Напсо М.Д.

Секция математики, физики и информационных технологий

Эдиев Д.М. – председатель секции, Борлаков Х.Ш., Кочкаров А.М., Тамбиева Д.А.,
Хапаева Л.Х.

Секция медицинских наук

Хапаев Б.А. – председатель секции, Гюсан А.О., Котелевец С.М., Смянов В.В.,
Темрезов М.Б., Чаушев И.Н.

Секция сельскохозяйственных наук

Смакуев Д.Р. – председатель секции, Джашеев А.-М.С., Гедиев К.Т., Гочияев Х.Н.,
Гочияева З.У.

Секция технических наук

Боташев А.Ю. – председатель секции, Байрамуков С.Х., Бисилов Н.У.

Секция экономики

Канцеров Р.А. – председатель секции, Токова Л.Д., Тоторкулов Ш.М.,
Узденова Ф.М., Шордан С.К.

Секция юриспруденции

Кочкаров Р.М. – председатель секции, Клименко Т.М., Напсо М.Б., Одегнал Е.А.,
Чочуева З.А.

Секция изобразительного искусства и прикладных видов искусств

Атаева Л.М. – председатель секции, Урусова Н.П., Урусова М.Ю., Хапчаева З.А.

Адрес редакции и издателя: 369000, Россия, КЧР, г. Черкесск,
ул. Ставропольская, 36, Северо-Кавказская государственная академия.

Телефон: 8(8782)293648; 8(8782)293560. E-mail: izvest_akad@mail.ru.

[http://ncsa.ru/page/content/nauchno-prakticheskii-i-uchebno-metodicheskii-
zhurnal-izvestija-sevkavggta.html](http://ncsa.ru/page/content/nauchno-prakticheskii-i-uchebno-metodicheskii-zhurnal-izvestija-sevkavggta.html)

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

Северо-Кавказской государственной академии

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЕТСЯ С 2010 ГОДА

Учредитель и издатель – Северо-Кавказская государственная академия

№ 3, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Даурова А.Б. К вопросу типологии иностранного акцента 3

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Эркенов Н.Х. Черноусова Л.В. Теоретическая оценка точности и сходимости
комбинированного метода расчета электромагнитного поля в осесимметричных системах..... 8

Кятов Н.Х. Влияние переменности рабочей площади образца на прочностные
характеристики грунта 13

Джэндубаев Э.А.-З. Разработка модели силового полупроводникового трансформатора
напряжения распределительной сети постоянного тока..... 21

CONTENTS 34

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 81.442

К ВОПРОСУ ТИПОЛОГИИ ИНОСТРАННОГО АКЦЕНТА

ДАУРОВА А.Б.

Северо-Кавказская государственная академия

В данной статье представлены закономерности функционирования звуковых единиц родного и изучаемого иностранного языка, определены некоторые аспекты типологии акцента в английской речи, а также различные факторы, влияющие на формирование определенного уровня владения иностранным языком.

Ключевые слова: фонетическая интерференция, иностранный акцент, английское произношение, парадигматика, синтагматика, позиционный, типология.

Усвоение фонетики чужого языка невозможно без сопоставления его звукового строя со звуковым строем родного языка.

Акцент может исследоваться, во-первых, в ходе анализа интерферированной звучащей речи, во-вторых, на основе сопоставления фонетической системы изучаемого языка с фонетической системой родного, в ходе которого выявляются сходства и расхождения между «контактирующими» системами. В связи с этим многие лингвисты писали о «фонологической призме» родного языка, сквозь которую человек воспринимает звуки неродного, «фонологическом сите», через которое «просеивается» система изучаемого языка [1, 2, 3].

Позиционные закономерности звукового строя языка могут определяться как наличием позиционной замены звуковых единиц, так и ограничениями на их употребление в конкретных позициях. В первом случае значимой оказывается фонетическая парадигматика, во втором – фонетическая синтагматика.

Область фонетической парадигматики составляют законы чередования звуковых единиц, а область фонетической синтагматики – законы сочетания звуковых единиц, т.е. отношения между единицами языка, возникающие при их последовательном расположении в линейной цепи (в речи, тексте). В большинстве иноязычных систем, где позиционные чередования обычно играют незначительную роль, имеет место ограниченная дистрибуция звуковых единиц, когда употребление той или иной фонемы в конкретной позиции оказывается синтагматически обусловлено.

Разделение языков по их звуковому строю на преимущественно парадигматические и преимущественно синтагматические может служить методологической основой для анализа некоторых аспектов фонетической интерференции. Возможно использование рассматриваемой концепции в ходе создания национально ориентированных курсов фонетики современного английского языка в национальной аудитории.

В языках различного звукового строя разный характер носит функционирование фонем. Термин «функционирование» по-разному трактуется в лингвистической литературе. В настоящей статье за основу взят подход, изложенный в работах К.В. Горшковой, согласно которому закономерности функционирования фонем в

словоформах «проявляются в том, что в определенных позициях появляются определенные звуки» [4].

Согласно такому подходу функционирование фонем в языках преимущественно парадигматического звукового строя заключается в основном в реализации фонем в звуках и их признаков – в признаках звуков.

В языках преимущественно синтагматического звукового строя функционирование фонем не может быть сведено лишь к их реализации в звуках. В таких языках либо совсем нет позиционной мены звуков пересекающегося типа, либо такая мена играет незначительную роль. Естественно, реализация фонем в звуках никогда или почти никогда не связана с нейтрализацией. Отсутствие или немногочисленность звуковых чередований пересекающегося типа компенсируется в языках преимущественно синтагматического звукового строя ограниченной дистрибуцией фонем. Обобщая сказанное, под функционированием звуковых единиц следует понимать закономерности употребления и реализации фонем в определенных позициях.

Несовпадение закономерностей функционирования звуковых единиц в родном и изучаемом языках обуславливает черты акцента. В этом отношении следует указать на две возможности:

- закономерности функционирования звуковых единиц в родном языке при наличии соответствующих позиционных условий переносятся учащимися на изучаемый язык;
- закономерности функционирования звуковых единиц в изучаемом языке не воспринимаются учащимися, если они не совпадают с закономерностями функционирования звуковых единиц в их родном языке.

Говоря о первой возможности, следует отметить, что под наличием соответствующих позиционных условий понимается наличие сходных фонетических позиций в родном и изучаемом языках. При анализе практически любой иноязычной системы легко найти как явления, для переноса которых в родном языке есть позиционные условия, так и явления, для переноса которых соответствующие условия отсутствуют. Первый тип явлений отражается в интерферированной иноязычной речи, второй – нет.

Работа над устранением связанных с позиционными закономерностями акцентных черт, как правило, не бывает должным образом предусмотрена в национально ориентированных курсах фонетики. Между тем результаты фонетической интерференции могут приводить к достаточно сильному искажению фонетического облика слова. Более того, именно особенности функционирования фонем нередко лежат в основе появления в иностранной речи «экзотических» звуков, далеких от фонетической системы изучаемого языка.

Позиционные закономерности изучаемого языка, как правило, не совпадают с позиционными закономерностями в родном языке учащихся. В этом случае новые для учащихся особенности функционирования звуковых единиц не воспринимаются ими. Этим объясняются типичные ошибки, связанные с отсутствием редукции английских гласных, отсутствием позиционной замены звонких согласных на глухие в абсолютном конце слова, отсутствием варьирования согласных по месту и способу образования и целый ряд других.

Сопоставительный анализ звукового строя английского и кабардино-черкесского языков позволяет определить типологию акцента в английской речи:

- в отличие от артикуляционного уклада английского языка, для которого характерно широкое и плоское (отодвинутое назад) положение языка с нейтральными или слегка растянутыми губами, с типичными гласными /i / и /э/, /a / и / u / – артикуляторный уклад кабардино-черкесского языка характеризуется более глубокой артикуляцией, в которой активно участвует гортань и глотка;
- в английском языке большая группа согласных артикулируется на альвеолах, в то время как в кабардино-черкесском и русском языках соответствующие им согласные артикулируются на зубах. Ср.: англ. [t], [d], [s], [z], [n], [l] и каб.-чер. [т], [д], [с], [з], [н], [л];
- в английском языке все согласные произносятся твердо, за исключением так называемого светлого [l], а также [j] и [ʒ]. В кабардино-черкесском и русском языках, наряду с твердыми согласными, существуют и соответствующие им мягкие;
- для английского языка характерно такое явление, как аспирация, или придыхание, глухих взрывных согласных [p], [t], [k], особенностью кабардино-черкесского глухого консонантизма также является придыхание.

Вопрос о глухих придыхательных согласных в кабардино-черкесском языке, их распределения и антропофонических особенностях до сих пор не получил однозначного решения. В описательных грамматиках и специальных исследованиях глухие придыхательные называют глухими непридыхательными, глухими с ларингальным придыханием и т.д. В данной работе принимается положение, согласно которому в кабардино-черкесском языке придыхательными являются все согласные за исключением сонантов, звонких и смычно-гортанных спирантов. Вопрос требует дальнейшего инструментального исследования.

В английском языке:

- все глухие согласные, за исключением [h], очень сильные и энергичные;
- все звонкие согласные очень слабые, как бы приглушенные;
- звонкие согласные перед глухими не оглушаются, например: [d] [d] [t] [t] good salt, woodcutter (ср.: пуд соли, будка);
- глухие согласные перед звонкими не озвончаются, например: [k] [t] [r] [d] blackbird, that day (ср.: также, тот день).

В кабардино-черкесском языке исследователи обратили внимание на специфику фонетической природы противопоставляемых глухих и звонких согласных. Как пишет Турчанинов: «Звонкость и глухость согласных звуков кабардинского языка, по нашим наблюдениям, в ряде случаев не соответствует звонкости и глухости согласных европейских языков. Звонкие согласные звуки часто более «оглушены», а глухие более «озвончены». Вопрос этот представляет интерес для науки и им следовало бы заняться особо» [5]. Звонкие согласные в кабардино-черкесском языке относятся к определенным типам, то есть они являются неполнозвонкими [6].

Общая фонетика делит звонкие согласные различных языков на следующие типы: полнозвонкие согласные, характеризующиеся тем, что голос участвует на всем протяжении произнесения этих согласных, то есть во время звучания, характерного для их шума; полузвонкие согласные, которые характеризуются тем, что голос участвует не на всем протяжении произнесения согласного, часть его звучит без голоса. При этом возможны два случая: согласный – в конце или наоборот.

Кабардино-черкесские звонкие согласные характеризуются глухим началом и звонким концом, то есть голос участвует не на всем протяжении произнесения звуков. Они имеют глухую смычку и звонкий взрыв. Общей особенностью смычных является продолжительная смычка и замедленный взрыв, сила взрыва у смычных еще более ослабевает в конце слова и почти исчезает между гласными [4].

При совпадении позиционных закономерностей в родном и изучаемом языках появляется возможность положительного переноса фонетических особенностей родного языка на изучаемый. Так, английский сонорный [j] (полугласный) очень слабый звук [j] произносится с меньшим шумом, чем соответствующий кабардино-черкесский [j], имеющий то же место образования преграды, что и [j], английские фонемы [ʒ], [ʃ] отличаются от кабардино-черкесских аналогичных звуков, при артикуляции которых образуется щель между средней частью спинки языка и твердым небом, тем, что при английских [ʃ] и [ʒ] образуется щель между кончиком языка и альвеолами, губы напряжены, при образовании сравниваемых звуков в кабардино-черкесском языке средняя часть языка поднимается к твердому небу, от чего эти звуки приобретают сходную мягкость. Эта особенность способствует правильному произношению английских звуков [ʃ] и [ʒ] для кабардинцев и черкесов.

Перенос позиционной закономерности родного языка на изучаемый язык обуславливает акцент произношения. Так, в англ. словах -has, have щелевой согласный h в английском и кабардино-черкесском языках произносится в гортани, но артикуляция разная: английский – фарингальная артикуляция; кабардино-черкесский – ларингальная. (ср. с русским [x], который произносится в ротовой полости). Например: ср. англ. «hat», каб.-черк. «хъэль», рус. «хата».

Таким образом, каждый язык имеет свои произносительные навыки, которые неизбежно «внедряются» в изучаемый язык, сильно искажая его общее звучание и подчас делая его весьма неблагозвучным. Именно такое неблагоприятное впечатление производит на самих носителей английского языка сильный, пусть то русский или кабардино-черкесский, или другой, акцент. Из сказанного не следует, однако, делать пессимистичных выводов. На самом деле акцент можно устранить при условии постоянной и упорной тренировки в произнесении звуков.

Учет данных сопоставительного анализа позиционных закономерностей звукового строя родного и изучаемого языков позволяет дополнить знания в области типологии акцента в иноязычной речи, а в некоторых случаях по-иному построить практические курсы фонетики.

Daurova A.B On the typology of foreign accent¹

Summary: *This article presents patterns of functioning of the sound units of a native and studied foreign language, defines some aspects of the typology of an accent in English speech as well as various factors influencing the formation of a certain level of proficiency in a foreign language.*

Keywords: *phonetic interference, foreign accent, pronunciation, paradigmatic relations, syntagmatic relations, positional, typology.*

¹ Текст на английском языке публикуется в авторской редакции.

Список использованных источников и литературы

1. Бернштейн С.И. Вопросы обучения произношению применительно к обучению русскому языку иностранцев // Общая методика обучения иностранным языкам: Хрестоматия / Сост. А.Л. Леонтьев. М., 1991.
2. Трубецкой П.С. Основы фонологии / Пер. с нем. Л.Л. Холодонича; под ред. С.Д. Капнельсона. М., 2000.
3. Реформатский А.А. Обучение произношению и фонология // Филологические науки. 1959. № 2.
4. Горшкова К.В. Фонетика // Горшкова К.В., Мустейкис К.В., Тихонов Л.Н. Современный русский язык. Часть I. Вильнюс. 1985.
5. Турчанинов Г.Ф., Цагов М. Грамматика кабардинского языка. М.–Л. 1940.
6. Балкаров Б.Х. Фонетика адыгских языков. – Нальчик, 1970.

Даурова Аннета Бзуберовна – доцент кафедры гуманитарных дисциплин Северо-Кавказской государственной академии. E-mail: andaur@mail.ru

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 537.8:621.382:538.311

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ И СХОДИМОСТИ
КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО
ПОЛЯ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ**

ЭРКЕНОВ Н.Х., ЧЕРНОУСОВА Л.В.

Северо-Кавказская государственная академия

В работе представлены результаты анализа скорости сходимости достаточно эффективного и относительно простого метода расчета электромагнитных сил поля в магнитогидродинамических устройствах (МГД). Показано, что итерационный процесс «область – граница» сходится со скоростью геометрической прогрессии со знаменателем, равным $(h^2 + \tau^2 + (h\tau))$, где h , τ – параметры однородных разностных схем.

Ключевые слова: итерация, погрешность метода, итерационный процесс, норма матрицы, сходимость метода, квадратурные формулы.

Теоретическое доказательство сходимости изложенного в работе [1] итерационного процесса важно при практической реализации рассмотренного в ней метода. В результате исследований оказалось возможным получить оценку погрешности метода и показать, что при решении интегрального уравнения первого рода (определение $\frac{\partial A}{\partial n}$ на границе Γ) регуляризующее воздействие оказывает временной шаг τ , а также величины h_{NR} и h_{Nz} . Отсюда следует, что запись граничных условий в виде [2]:

$$0,5h_z\gamma\mu_o \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial v}{\partial z} - f_1(\rho, z), \rho, z \in OE,$$

$$0,5h_z\gamma\mu_o \frac{\partial v}{\partial t} = f_2(\rho, z) - \frac{\partial v}{\partial z}, \rho, z \in FD,$$

$$0,5h_\rho\gamma\mu_o \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial \rho} + f_3(\rho, z), \rho, z \in EF,$$

где $f_1(\rho, z) = f_2(\rho, z) = \rho \frac{\partial v}{\partial z}$, $f_3(\rho, z) = \rho \frac{\partial v}{\partial \rho} + v \cos(n \wedge \rho)$,

позволяет не только согласовать погрешность их аппроксимации с погрешностью самого уравнения, но и дает возможность гарантированно управлять итерационным процессом «область – граница».

Введем в рассмотрение одну из обычных норм векторов и матриц [3], а именно, обозначим для произвольного вектора $u = (u_1, u_2, \dots, u_M)$ его кубическую норму через

$$\|u\|_1 = \max_{i \in (1:N_L)} |u_i|, \quad (1)$$

а подчиненную ей норму некоторой матрицы

$$C = [C_{ij}]_{i,j=1}^{N_L} \text{ через } \|C\|_1 = \max_{i \in (1:N_L)} \sum_{j=1}^{N_L} |C_{ij}|. \quad (2)$$

Отметим, что приведенные ниже рассуждения могут быть по аналогии легко проведены и в двух других основных нормах векторов и матриц. Ниже будет полезной оценка погрешности решения СЛАУ вида $\tilde{C}\tilde{U} = \tilde{B}$ с приближенно заданной матрицей $\tilde{c} = c + \Delta c$ и свободным вектором $\tilde{b} = b + \Delta b$, где Δc и Δb – соответственно матрица и вектор погрешностей, c и b – соответственно точно заданные матрица и свободный вектор.

В работе [3] показано, что такая оценка имеет вид

$$\|u - \tilde{u}\| \leq \|c^{-1}\| \left(\|\Delta b\| + \|\tilde{u}\| \|\Delta c\| \right), \quad (3)$$

где $\|\bullet\|$ – какая-нибудь норма вектора и соответственно подчиненная ей норма матрицы; c^{-1} – обратная матрица точной матрицы c ; u – решение точной системы уравнений $cu = b$.

Обозначим через $R_N(\Gamma)$ и $R_N(D_n)$ погрешности вычисления по некоторым квадратурным формулам, соответствующим интегралам в $\pi\rho_Q A = \int_{\Gamma} A(M) \frac{\partial G_1}{\partial n_M} - \int_{\Gamma} G_1 \frac{\partial A(M)}{\partial n_M} \partial l_M + \mu_0 \iint_{D_n} \delta_n(t) G_1(Q, P) dS_p$, включающие в себя и погрешность вычисления функций $G_1(Q, M)$ и $\frac{\partial G_1(Q, M)}{\partial n}$.

Для сокращения выкладок запишем СЛАУ $[H]\{A\} = [Q_n] \left\{ \frac{\partial A}{\partial n} \right\} + \{A_n\}$ и разностные уравнения (2.68), (2.75) [2]:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma} \frac{Y_{i1}^{j+1/2} - Y_{i1}^j}{\tau} &= \Lambda_{\rho} Y_{i1}^{j+1/2}, \\ \tilde{\gamma} \frac{Y_{i2}^{j+1} - Y_{i2}^j}{\tau} &= \Lambda_{\rho} Y_{i1}^{j+1}, \\ \tilde{\gamma} \frac{Y_{i2}^{j+3/2} - Y_{i2}^{j+1}}{\tau} &= \Lambda_z Y_{i2}^{j+3/2}, \\ \tilde{\gamma} \frac{Y_{i2}^{j+2} - Y_{i2}^{j+3/2}}{\tau} &= \Lambda_{\rho} Y_{i1}^{j+2}, \\ 0,5h_z \mu_o \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial v}{\partial z} - f_1(\rho, z), \rho, z \in OE, \end{aligned}$$

$$0,5h_z\gamma\mu_o \frac{\partial v}{\partial t} = f_2(\rho, z) - \frac{\partial v}{\partial z}, \rho, z \in FD,$$

$$0,5h_\rho\gamma\mu_o \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial \rho} + f_3(\rho, z), \rho, z \in EF,$$

где $f_1(\rho, z) = f_2(\rho, z) = \rho \frac{\partial v}{\partial z}$, $f_3(\rho, z) = \rho \frac{\partial v}{\partial \rho} + v \cos(n \wedge \rho)$,

соответственно в виде

$$[Q]\bar{X} = f(\bar{Y}) \quad (4)$$

и

$$[\Lambda]Y = q(\bar{X}). \quad (5)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\bar{X} = \left\{ \frac{\partial A}{\partial n} \right\}, \bar{Y} = \{A\}.$$

Согласно схеме предлагаемого метода на S-ом шаге итерационного процесса системы (4) и (5) примут соответственно вид:

$$[Q_n]\bar{X}^s = f(\bar{Y}^{s-1}), \quad (6)$$

$$[\Lambda]\bar{Y}^s = q(\bar{X}^{s-1}), \quad (7)$$

где \bar{X}^s, \bar{Y}^s – итерационные приближения для X и Y.

Условие сходимости предлагаемого алгоритма и, следовательно, правомерность его применения к рассматриваемой задаче следуют из теоремы, представленной ниже.

Теорема. Пусть $h = \max(h_\rho, h_z)$ и τ такие, что выполняется неравенство

$$\varphi_1(h, \tau) = \|Q_n^{-1}\| \|G'\| \|\Lambda^{-1}\| \varphi(h, \tau) < 1, \quad (8)$$

где $\varphi(h, \tau) = \max \left[\frac{h_{1z}\tau}{0,5h_{1z}^2\gamma\mu_o + \tau}, \frac{h_{Nz}}{0,5h_{Nz}^2\gamma\mu_o + \tau}, \frac{h_{Nr}\tau}{0,5h_{Nr}\gamma\mu_o + \tau} \right]$,

$$\|G'\|_{CL} = \left\| \int_{\Gamma} \frac{\partial G_1}{\partial n_M} dl_M \right\|_{CL} := \max_{Q \in \Gamma} \left| \int_{\Gamma} \frac{\partial G_1}{\partial n_M} dl_M \right|. \quad (9)$$

Тогда на S-м шаге итерационного процесса (6)-(7) для решения задачи на j-ом временном слое справедливы следующие оценки погрешности комбинированного метода:

$$\|\Delta X^s\| = \left\| \frac{\partial A}{\partial n} - \frac{\partial A^s}{\partial n} \right\| \leq \xi_Q \frac{1 - \varphi_1^s(h, \tau)}{1 - \varphi_1(h, \tau)} + \varphi_1^s(h, \tau) \cdot \|\Delta X^0\|, \quad (10)$$

$$\|Y^s\| = \|A - A^s\| \leq \|\Lambda^{-1}\| \left[\xi_\Lambda + \xi_Q \frac{1 - \varphi_1^s(h, \tau)}{1 - \varphi(h, \tau)} + \varphi_0(h, \tau) \varphi_1^s(h, \tau) \Delta X^0 \right], \quad (11)$$

$$\text{где } \xi_Q = \left[\|G'\| \|\Lambda^{-1}\| \xi_\Lambda + R_N(\Gamma) + R_N(D_n) + \|\Delta X^s\| \|Q_n^{-1}\| \right] \cdot \|Q_n^{-1}\|, \quad (12)$$

а $\xi_\Lambda = O(h_z^2 + h_p^2 + \tau^2)$ – погрешность аппроксимации исходной начально-краевой задачи при использовании конечно-разностного метода:

$$\|\Delta X^0\| = \left\| \int_\Gamma A(M) \frac{\partial G_1(Q, M)}{\partial n_M} dl_M \right\| + \pi \rho_Q \|A\|.$$

Доказательство. Воспользовавшись оценкой (4) применительно к системам (5), (6) получим

$$\|\Delta X^s\| = \|X - X^s\| \leq \|Q_n^{-1}\| \left[\|\Delta Q_n\| \|X^s\| + R_N(\Gamma) + R_N(D_n) + \|\Delta f(y^{s-1})\| \right],$$

где

$$\|\Delta f(y^{s-1})\| = \|G'\| \|\Delta y^{s-1}\|. \quad (13)$$

Аналогично для (2.86.), (2.88) [2] с учётом (2.82), (2.83), (2.89)-(2.90) [2], получим

$$\|\Delta Y^s\| = \|\Delta A^s\| \leq \left[\xi_\Lambda + \varphi(h, \tau) \right] \|\Delta X^s\| \quad (14)$$

Подставив (14) в (13), согласно (8), (9) получаем:

$$\begin{aligned} \|\Delta X^s\| &\leq \|Q_n^{-1}\| \left[\|\Delta Q_n\| \|X^s\| + R_N(\Gamma) + R_N(D_n) + \|G'\| \|\Lambda^{-1}\| \left(\xi_\Lambda + \varphi(h, \tau) \|\Delta X^{s-1}\| \right) \right] = \\ &= \xi_Q + \varphi(h, \tau) \|\Delta X^{s-1}\|. \end{aligned}$$

На основании этой оценки последовательно шаг за шагом получим для $\|\Delta X^{s-1}\|, \|\Delta X^{s-2}\|, \dots, \|\Delta X\|$:

$$\begin{aligned} \|\Delta X^s\| &\leq \xi_Q + \varphi_1(h, \tau) \left[\xi_Q + \varphi_1(h, \tau) \|\Delta X^{s-2}\| \right] \leq \dots \leq \xi_Q \left[\varphi_1(h, \tau) + \varphi_1^2(h, \tau) + \dots + \varphi_1^{s-1}(h, \tau) \right] + \\ &+ \varphi_1^s(h, \tau) \|\Delta X^0\| = \frac{1 - \varphi_1^s(h, \tau)}{1 - \varphi_1(h, \tau)} \xi_Q + \varphi_1^s(h, \tau) \|\Delta X^0\|. \end{aligned}$$

Этим неравенство (10) доказано. Неравенство (11) вытекает из неравенства (8), (14) следующим образом:

$$\begin{aligned} \|\Delta Y^s\| = \|\Delta A^s\| &\leq \|\Lambda^{-1}\| \left[\xi_\Lambda + \varphi(h, \tau) \times \left(\xi_Q \frac{1 - \varphi_1^s(h, \tau)}{1 - \varphi_1(h, \tau)} + \varphi_1^s(h, \tau) \|\Delta X^0\| \right) \right] = \\ &= \|\Lambda^{-1}\| \left[\xi_\Lambda + \xi_Q \frac{1 - \varphi^s(h, \tau)}{1 - \varphi_1(h, \tau)} \cdot \varphi(h, \tau) + \varphi(h, \tau) \varphi_1^s(h, \tau) \|\Delta X^0\| \right]. \end{aligned}$$

Теорема доказана.

Используя известные оценки [4] и результаты работы [5] погрешностей квадратурных формул, применяемых в вычислительных экспериментах на ЭВМ, из доказанной теоремы легко получить следующее следствие.

Следствие. Пусть решение задачи (2.46)-(2.47) [3, с.52] A_1 и A_2 принадлежит пространству $W_{Lp}^{(3)}(D)$. Тогда в условиях теоремы при использовании формул Гаусса 3-го порядка для вычисления интегралов в (2,52) справедлива оценка при $h_\rho = h_z = h$

$$\begin{aligned}\|\Delta X^s\| &\leq O(h^2 + \tau^2 + h^2(\ln h) + (h\tau)^s); \\ \|\Delta Y^s\| &\leq O(h^2 + \tau^2 + (h\tau)^{s+1}).\end{aligned}$$

Erkenov N.H., Chernousova L.V. Theoretical evaluation of the accuracy and convergence of the combined method for calculating the electromagnetic field in axisymmetric systems²

Summary: *The paper considers the convergence rate of an effective, relatively easy-to-implement method for calculating electromagnetic field forces in magneto-hydro-dynamic devices (MHD). Studies in this direction have shown that the «region–boundary» iterative process converges at a geometric progression rate with a denominator equals $(\square^2 + \tau^2 + (h\tau))$, to where h, τ – are the parameters of homogeneous difference schemes.*

Keywords: *iteration, method error, iterative process, matrix norm, method convergence, quadrature formulas.*

Список использованных источников и литературы

1. Акишин Б. А., Эркенов Н. Х., Озова Л. В. Метод численного расчета электромагнитных полей в осесимметричных системах. Труды Международной научной конференции: Современные проблемы математического моделирования, обработки изображений и параллельных вычислений, Том 2, (г. Геленджик, Краснодарский край 4-11 сентября 2017 г.), с.6-8.
2. Эркенов Н. Х. Моделирование электромагнитных процессов в МГД устройствах, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, г. Киев, 1992 г.
3. Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И. Вычислительные методы. М.: Наука. 1976. Т.1. 304 с.
4. Бахвалов Н. С. Численные методы. М.: Наука. 1973. с.631.
5. Никольский С. М. Квадратурные формулы: Наука. 1979. с.256.

Эркенов Наурузби Хусейнович – к.т.н, доцент кафедры «Электроснабжение» Северо-Кавказской государственной академии (СКГА). Тел. 8(878)-2293560. E-mail: nauruz1@yandex.ru.

Черноусова Лилия Владимировна – старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» СКГА. Тел. 8(878)-2293560. E-mail: hlili2017@yandex.ru.

² Текст на английском языке публикуется в авторской редакции.

УДК 624.131.37: 624.131.439

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ РАБОЧЕЙ ПЛОЩАДИ ОБРАЗЦА НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТА

КЯТОВ Н.Х.

Северо-Кавказская государственная академия

В работе рассмотрено влияние характера переменности рабочей площади образца на результаты определения прочностных характеристик грунтов методом консолидировано-дренированного (медленного) одноплоскостного среза. Установлена зависимость между рабочей площадью и горизонтальным перемещением. Получены значения коэффициента переменности рабочей площади образца грунта при одноплоскостном срезе.

Ключевые слова: грунт, лабораторные испытания, одноплоскостной срез, угол внутреннего трения, удельное сцепление, коэффициент переменности рабочей площади.

Особенностью оснований и фундаментов является зависимость их надежности от неопределенности свойств грунтов. Образцы грунта в виде монолитов и кернов, отбираемые из массива для определения свойств, очень чувствительны к способам отбора, хранения и испытания, в результате которых возможны разрыхление, уплотнение, нарушение структуры, изменение содержания влаги, приводящие к изменениям свойств грунта. Одним из основных причин неопределенности является пространственная изменчивость свойств грунтов из-за крайней неоднородности, например, коэффициент вариации сопротивления сдвигу песчаных и пылевато-глинистых грунтов изменяется в весьма значительных пределах: 0,05-0,6. Поэтому вопрос о сопротивлении грунтов сдвигу и методики определения прочностных характеристик являются чрезвычайно важным для практики строительства.

Необходимая надежность основания и снижение стоимости возведения нулевого цикла зависят от достоверной оценки уровня надежности определения характеристик деформируемости и прочности грунтов, слагающих основания. Из стандартных методов в соответствии с EN 1997-2:2009 и СП 47.13330. 2016 наиболее распространенными в инженерно-геологической практике при определении характеристик прочности несвязных и связных грунтов являются стандартная [1, 2] схема одноплоскостного среза с предварительным уплотнением, ступенчатым увеличением нагрузки со свободным оттоком воды и трехосные стабилметрические испытания. В одноплоскостных срезных приборах с фиксированной плоскостью среза испытания образцов грунта проводятся путем сдвига одной части образца относительно другой его части горизонтальной нагрузкой при предварительном нагружении образца нагрузкой, нормальной к плоскости среза.

Сопротивление сдвигу характеризует прочность грунтов. Разрушение грунта происходит в момент, когда величина касательных напряжений на поверхности разрушения достигает своего предельного значения, равного сопротивлению грунта сдвигу

$$\tau_{np} = \sigma tg\varphi + c, \quad (1)$$

где τ_{np} и σ – касательные и нормальные напряжения, действующие на поверхности возможного сдвига; φ – угол внутреннего трения грунта; c – удельное сцепление.

Стандартные нормативные методы являются основными инструментами при проектировании оснований и фундаментов, и тем не менее не лишены недостатков, например, для приборов одноплоскостного среза таковыми являются [3-6]: неоднородность напряженного состояния по высоте образца вследствие различных конструктивных и технологических причин; переменность рабочей площади образца, свидетельствующая о зависимости тангенциальных напряжений от величины горизонтального смещения образца; неравномерность распределения касательных напряжений, результатом которого является не одновременное разрушение грунта во всех точках потенциальной поверхности среза; трудность управления дренированием и определением порового давления; ограниченность величины сдвигающей деформации; не соответствие плоскости среза понятию «плоскость – идеально равная и гладкая поверхность», так как она имеет объемную форму в виде цилиндра высотой 0,5 мм для связных и 1,0 мм для несвязных грунтов [1], указывающую на более сложные механические процессы, происходящие в грунте (рис. 1), чем при простом срезе; возможность выдавливания грунта в процессе испытания в зазор между подвижной и неподвижной частями срезной коробки и непостоянство величины этого зазора. Поэтому максимальное (предельное) значение сопротивления сдвигу грунтов в приборах одноплоскостного среза чаще всего не соответствует действительному.

Сопротивление грунтов сдвигу обусловлено внутренним трением и зацеплением перемещающихся частиц между собой и силами сцепления. Сопротивление сдвигу одного и того же грунта непостоянно и зависит от его физического состояния: степени нарушения естественной структуры, плотности, влажности, а также от условий производства испытаний (конструкция прибора, размеры образца, скорость сдвига и т. д.). Для получения наиболее достоверных данных испытания на сдвиг должны проводиться в условиях, максимально приближающихся к условиям работы грунта в основании сооружения [6-8] с учетом указанных ранее недостатков.

При проведении испытаний по мере развития горизонтальных смещений δ каретки сдвигового прибора (рис. 1) под воздействием горизонтальной нагрузки G грунт (рыхлый песок) начинает без изменения сжимающей вертикальной нагрузки N дополнительно уплотняться, т.е. наблюдается осадка штампа сдвигового прибора (явление контракции) или разрыхляться (плотный песок), происходит подъем штампа (проявление дилатансии).

Наибольшее дополнительное уплотнение или разрыхление развивается к моменту начала разрушения сдвига образца. Явления дилатансии и контракции возникают в меньшей степени и в связных пылевато-глинистых грунтах.

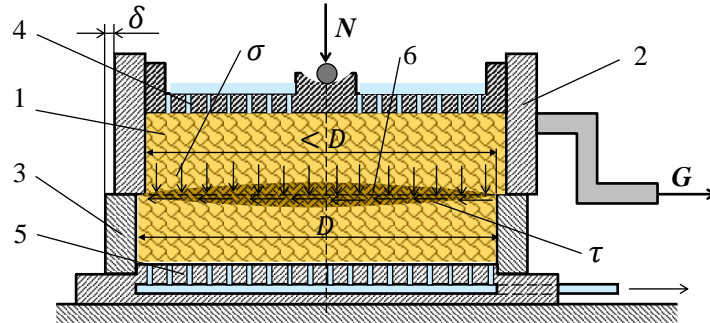


Рис. 1. Схема одноплоскостного сдвигового прибора: 1 – образец грунта, 2 и 3 – верхняя подвижная и нижняя неподвижная часть прибора (каретки), 4 и 5 – верхний и нижний дырчатые штампы, 6 – плоскость среза

Не вдаваясь в детали способности грунтов к объемным деформациям (дилатансия и контракция) в результате развития в них только деформации сдвига и воздействия направления сдвига и скорости сдвига на результаты испытаний [6, 7], рассмотрим влияние переменности плоскости сдвига на характеристики прочности грунта.

Рассмотрим процесс зарождения и развития тангенциальных напряжений в плоскости среза по мере развития горизонтальных перемещений на примере экспериментальных графиков (рис. 2), где сопротивления сдвигу при различных нормальных напряжениях постепенно увеличиваются до определенных стабилизированных предельных значений.

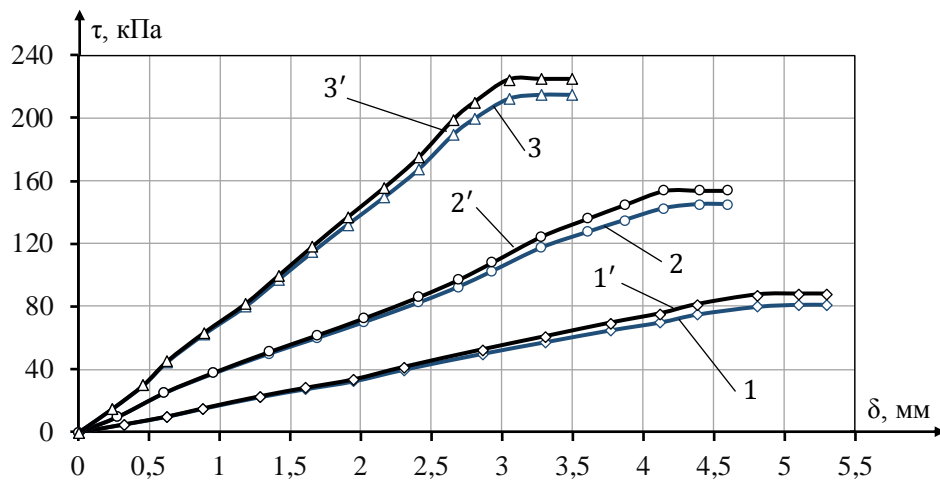


Рис. 2. График зависимости касательных напряжений τ от горизонтальных перемещений δ : 1, 2 и 3 – при нормальных напряжениях 100, 200 и 300 кПа соответственно и площади образца грунта 40 см²; 1', 2' и 3' – при тех же нормальных напряжениях и переменной рабочей площади

Пусть при нормальных напряжениях σ 100, 200 и 300 кПа за предельные сопротивления образца грунта срезу приняты значения касательных напряжений τ соответственно 80, 145 и 215 кПа (рис. 2, кривые 1, 2 и 3). При сдвиге реактивные

давления грунта на интервале $mb'n$ подвижной каретки распределяются неравномерно (рис. 3): по середине максимальные, с удалением от нее постепенно уменьшаются и достигают нуля по краям. Аналогичные давления возникают и на интервале mdn неподвижной каретки. На интервале $md'n$ подвижной каретки реактивные давления отсутствуют.

Первые ступени горизонтальных нагрузок, соответствующие касательным напряжениям 5, 10 и 15 кПа, в силу их незначительности по сравнению с предельными, вызывают только упругие деформации 0,39, 0,36 и 0,27 мм, уменьшающие рабочую площадь образца. Грунт в окрестности интервала $mb'n$ подвижной каретки получает небольшую сжимающуюся горизонтальную деформацию и местный частичный сдвиг.

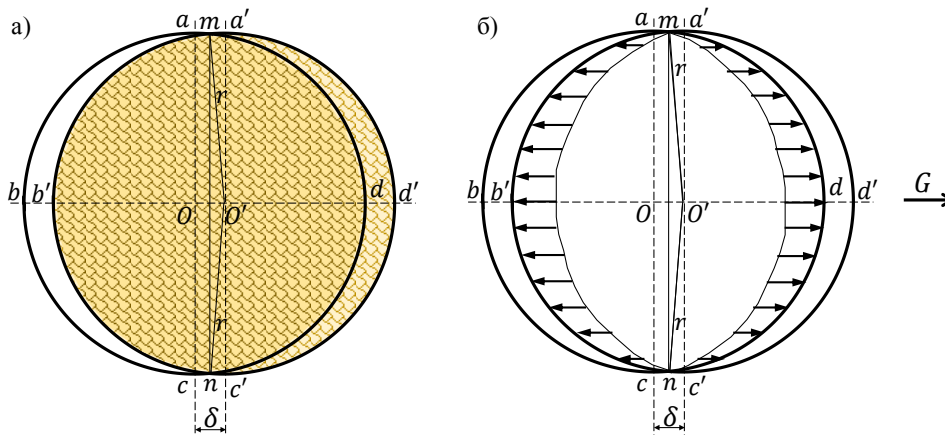


Рис. 3. Схема плоскости среза образца грунта ($abcd$ – начальное положение каретки прибора до сдвига, $a'b'c'd'$ – положение подвижной каретки прибора после сдвига на величину δ , $mb'nd$ – рабочая площадь)

В предполагаемой плоскости среза начинается процесс зарождения касательных напряжений: в окрестности точки m максимальные, с удалением от нее постепенно уменьшаются, принимая ориентировочно треугольную форму распределения на интервале $b'd$. Аналогичные процессы происходят и при следующих нескольких ступенях горизонтальных нагрузок, вызывающих дальнейшее развитие касательных напряжений в предполагаемой плоскости среза, несущественных сжимающих горизонтальных деформаций и местных сдвигов. При этом эпюра распределения касательных напряжений на интервале $b'd$ постепенно стремится к трапецевидной. При дальнейшем увеличении горизонтальных нагрузок величина рабочей площади A_p уменьшается пропорционально горизонтальным перемещениям δ (рис. 4), интенсивность увеличения касательных напряжений возрастает и при достижении им предельных значений происходит срез образца грунта.

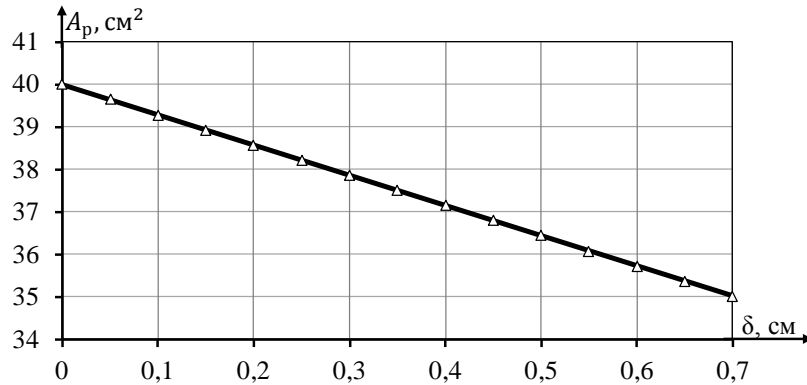


Рис. 4. График зависимости рабочей площади от горизонтальных перемещений
 Зависимость рабочей площади A_p от величины горизонтального перемещения δ образца грунта при сдвиге определяется выражением

$$A_p = \frac{D}{2} \left[\frac{\pi D}{180} \arccos\left(\frac{\delta}{D}\right) - \delta \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{D}\right)^2} \right], \quad (2)$$

где D – диаметр образца грунта; δ – величина горизонтального перемещения образца грунта при сдвиге.

Из графика (рис. 4), построенного по формуле (2), следует, что зависимость $A_p = f(\delta)$ является линейной, уравнение которой имеет вид

$$A_p = A - \delta k_c, \quad (3)$$

где A – площадь поперечного сечения образца грунта; $k_c = tg\alpha$ – коэффициент переменности рабочей площади; α – угол наклона прямой к оси δ .

Значение коэффициента переменности рабочей площади для образца грунта стандартной площади 40 см^2 по мере выполнения испытаний на срез до достижения $\delta = 2 \text{ мм}$ практически не изменяется (таблица), но с увеличением горизонтальных перемещений δ интенсивность уменьшения возрастает и при достижении 2 мм коэффициент примерно равен $k_c = 7,1356 \text{ см}$. Значения k_c , приведенные в таблице (промежуточные значения k_c определяются путем линейной интерполяции), могут быть использованы для корректировки прочностных характеристик грунта.

Таблица

Значения коэффициента переменности рабочей площади

δ	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7
k_c	7,1364	7,1363	7,1360	7,1356	7,1350	7,1344	7,1336	7,1328	7,1307	7,1281	7,1250

Уменьшается также и рабочая площадь образца

$$A_p = 40 - 0,2 \cdot 7,1356 = 38,6 \text{ см}^2 = 0,00386 \text{ м}^2,$$

что составляет 96%, следовательно, рабочая площадь образца грунта при горизонтальном перемещении, равном 2 мм, уменьшается на 4%, а при достижении горизонтальных перемещений допускаемых 10% [1], рабочая площадь уменьшается на 12,7%.

Аналогичные вычисления показали, что коэффициент переменности рабочей площади с увеличением площади образца грунта пропорционально увеличивается (рис. 5) и ориентировочно принимает значения, равные диаметру образца.

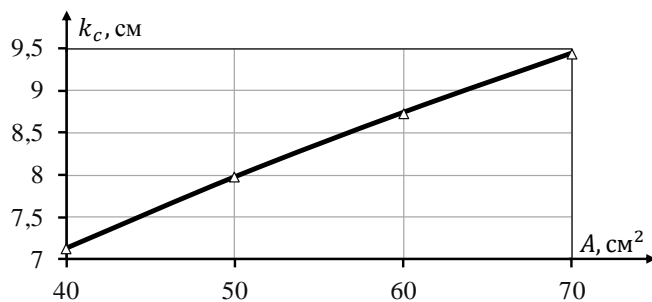


Рис. 5. График зависимости коэффициента переменности рабочей площади от площади образца грунта

По величинам максимального (предельного) сопротивления грунта срезу τ , определенным в соответствии с требованиями ГОСТ [1] при различных нормальных давлениях (вертикальных напряжениях σ), построены графики зависимости $\tau = f(\sigma)$ без учета и с учетом переменной рабочей площади образца грунта (рис. 6).

В соответствии с требованиями ГОСТ [2] определены характеристики прочности грунта:

- 1) без учета переменной рабочей площади $\varphi_1 = 33,4^\circ$, $c_1 = 12,8$ кПа;
- 2) с учетом переменной рабочей площади $\varphi_2 = 35,5^\circ$, $c_2 = 14,1$ кПа.

Полученные результаты показали, что с учетом переменной рабочей площади образца, такие характеристики прочности грунта, как угол внутреннего трения и удельное сцепление увеличились соответственно на 6,3% и 10,2%.

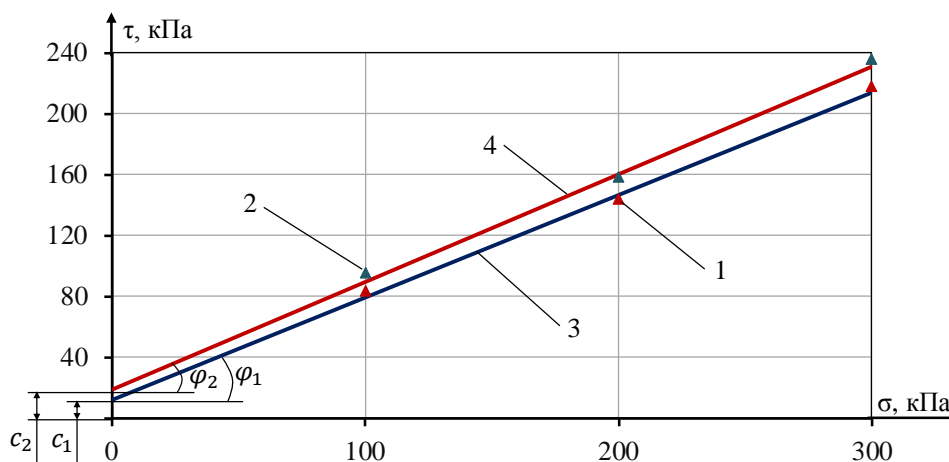


Рис. 6. График зависимости $\tau = f(\sigma)$: 1 и 2 – предельные касательные напряжения без учета и с учетом переменной рабочей площади; 3 и 4 – зависимости $\tau = f(\sigma)$ без учета и с учетом переменной рабочей площади

Таким образом, на основании анализа влияния переменной рабочей площади образца на прочностные характеристики грунта можно сделать вывод, что характер зависимости $A_p = f(\delta)$ практически не отличается от линейной, и значение коэффициента переменной рабочей площади ориентировочно равно диаметру образца грунта. Коэффициенты переменной рабочей площади, соответствующие определенным значениям горизонтальных перемещений, можно использовать для корректировки результатов определения характеристик прочности грунта, полученным способом одноплоскостного среза.

Kyatov N.H. Influence of the variability of the working area of the sample on the strength characteristics of the soil³

Summary: The paper considers the influence of the nature of the variability of the working area of the sample on the results of determining the strength characteristics of soils by

³ Текст на английском языке публикуется в авторской редакции.

the method of consolidated-drained (slow) single-plane cut. The relationship between the working area and horizontal displacement is established. The values of the coefficient of variability of the working area of the soil sample in a single-plane section are obtained

Keywords: *soil, laboratory tests, single-plane section, internal friction angle, specific adhesion, coefficient of variability of the working area*

Список использованных источников и литературы

1. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – МНТКС, 2011. – 162 с.
2. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – МНТКС, 2012. – 21 с.
3. К. Терцаги. Механика грунтов в инженерной практике. М.: Стройиздат, 1958. – 608 с.
4. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов / Учебное пособие. – М.: Изд. АСВ, 2005. – 488 с.
5. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И. Механика грунтов: Учебник. – М.: Изд. АСВ, 2009. – 264 с.
6. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
7. Болдырев Г.Г., Колесников А.С., Новичков Г.А. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения прочностных характеристик грунтов. Журнал «Инженерные изыскания», №5-6/2014, с. 78-85.
8. Алексеев С.И. Механика грунтов. Избранные главы: учебное пособие. – СПб., 2016. – 88 с.

Кяттов Нурби Хусинович – канд. техн. наук, доцент кафедры строительства и управления недвижимостью Северо-Кавказской государственной академии. E-mail: kyatov@mail.ru

УДК 621.182

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИЛОВОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА⁴

ДЖЕНДУБАЕВ Э.А.-З.

Северо-Кавказский федеральный университет

Представлена модель силового полупроводникового трансформатора напряжения постоянного тока, разработанная в системе MATLAB/SimPowerSystems, в состав которой входят пять однотипных ячеек (подсистем) со среднечастотным инвертором, двухобмоточным однофазным среднечастотным трансформатором переменного тока и однофазным мостовым выпрямителем с фильтром. Приведены результаты моделирования переходных процессов при подключении полупроводникового трансформатора к электрической сети постоянного тока и набросе нагрузки.

Ключевые слова: полупроводниковый трансформатор, постоянный ток, инвертор, выпрямитель, сеть постоянного тока.

В связи с развитием технологий «Умные сети электроснабжения (англ. *Smart grid*)» на электрических подстанциях распределительных сетей постоянного тока вместо классического низкочастотного трансформатора (50 Гц) стали использовать среднечастотный полупроводниковый трансформатор напряжения переменного тока (1÷150 кГц), который выполняет не только стандартные функции трансформатора, но и позволяет управлять потоками энергии, стабилизировать напряжения и повысить эффективность энергосистемы.

Такой полупроводниковый трансформатор состоит из следующих последовательно соединенных преобразователей (от входа к выходу): переменного тока (50 Гц) в постоянный (Выпрямитель AC/DC); постоянного тока в переменный ток (Инвертор DC/AC) средней частоты (1÷150 кГц); силового среднечастотного трансформатора (Преобразователь AC/AC); переменного среднечастотного тока в постоянный (Выпрямитель AC/DC); постоянного тока в переменный (Инвертор DC/AC) стандартной частоты (50 Гц). В состав полупроводникового трансформатора также входят фильтры, системы управления и иные устройства.

Таким образом, в полупроводниковом трансформаторе напряжения переменного тока (AC/AC) электрическая энергия четыре раза преобразуется с помощью силовых полупроводниковых устройств и один раз – с помощью среднечастотного силового трансформатора, что ухудшает его массогабаритные, энергетические и экономические показатели по сравнению с полупроводниковым трансформатором напряжения постоянного тока (DC/DC).

Более эффективным решением может стать перевод энергосистем на постоянный ток путем использования на подстанциях распределительной сети, силовых полупроводниковых трансформаторов напряжения постоянного тока (Конверторы

⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20–38–90127).

DC/DC) и соответствующих ЛЭП. Трансформаторы такого типа состоят из трех преобразователей. Это преобразователь напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока средней частоты, т.е. инвертор (DC/AC), преобразователь напряжения переменного тока в переменное напряжение в виде среднечастотного силового трансформатора (AC/AC), преобразователь напряжения переменного тока средней частоты в напряжение постоянного тока (AC/DC), т.е. выпрямитель. Таким образом, полупроводниковые трансформаторы постоянного тока имеют в своем составе в два раза меньше полупроводниковых преобразователей, чем полупроводниковые трансформаторы напряжения переменного тока (AC/AC).

Следует отметить, что в большинстве случаев роль ключевых элементов в инверторах выполняют высокоэффективные биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ, англ. Insulated-gate bipolar transistor, IGBT). Благодаря этим транзисторам инверторы получили широчайшее распространение в источниках вторичного электропитания (телевизоры, компьютеры, зарядные устройства) [1], в электродуговой сварке, в электроприводах промышленных и бытовых устройств, а также в электротранспорте (электровозы, электромобили, троллейбусы, трамваи) и т.д. [2]. Инверторы на основе тиристоров нашли применение в высоковольтных системах электропередачи на постоянном токе (HVDC).

В своем большинстве устройства, в которых используются инверторы на основе БТИЗ (IGBT), подключаются к сети низкого напряжения, для которого разработаны многочисленные серии транзисторов этого типа. Что касается высоковольтных БТИЗ (IGBT) большой мощности, то определенный прогресс наблюдается, но не более.

В связи с этим в современных полупроводниковых трансформаторах напряжением 10 кВ используется модульный принцип, при котором входы модулей соединяются последовательно, а выходы – параллельно [3]. В данном случае в состав модулей входят среднечастотный инвертор (DC/AC), среднечастотный трансформатор (AC/AC), выпрямитель с фильтром (AC/DC), т.е. этот модуль представляет собой конвертор (DC/DC), с наибольшим, на данный момент времени, напряжением и мощностью транзисторов БТИЗ (IGBT).

Поскольку количество преобразований в полупроводниковом трансформаторе постоянного тока (DC/DC) меньше, чем у полупроводникового трансформатора переменного тока (AC/AC), то и в случае использования модульной конструкции, это преимущество, при прочих равных условиях, останется в силе.

В связи с этим создание модели полупроводникового трансформатора постоянного тока является актуальной задачей.

Для её решения воспользуемся системой компьютерной математики MATLAB и ее расширениями Simulink и SimPowerSystems, которые обеспечивают блочное визуально-ориентированное имитационное моделирование [4].

В качестве прототипа была использована модель двухзвенного преобразователя, выполненного по двухтактной схеме с промежуточным трансформатором (Конвертор DC/DC), представленная в [5, с. 221]. Модель была воспроизведена по тексту книги. Результаты моделирования полностью совпали с данными, приведенными в книге.

В эту модель были внесены следующие изменения:

- с целью ускорения расчета модель с непрерывным временем была преобразована в дискретную модель.

– вместо трехобмоточного линейного трансформатора и выпрямителя, выполненного по двухфазной схеме (лучевая схема со средней точкой), соответственно был использован двухобмоточный трансформатор и однофазный мостовой выпрямитель.

При разработке модели полупроводникового трансформатора напряжения постоянного тока (DC/DC), примем, что его мощность равна 1000 кВА, входное напряжение $U_1 = \sqrt{2} \cdot 10000 = 14140$ кВ, напряжение на выходе трансформатора $U_2 = 400$ В, а частота равна $f_1 = 10$ кГц

В настоящее время при разработке полупроводникового трансформатора используют однотипные ячейки с меньшим напряжением, что связано с оптимизацией экономических показателей и существующими технологическими ограничениями, которые препятствуют созданию высоковольтных транзисторов для инверторов. Следует отметить, что входы этих ячеек соединяют последовательно, а выходы – параллельно. В данном случае их количество принято равным пяти, при этом первичное напряжение на входе каждой из них составляет $14140/5 = 2828$ кВ, а мощность – 200 кВт.

Модель среднечастотного полупроводникового трансформатора напряжения постоянного тока (DC/DC) представлена на рис. 1.

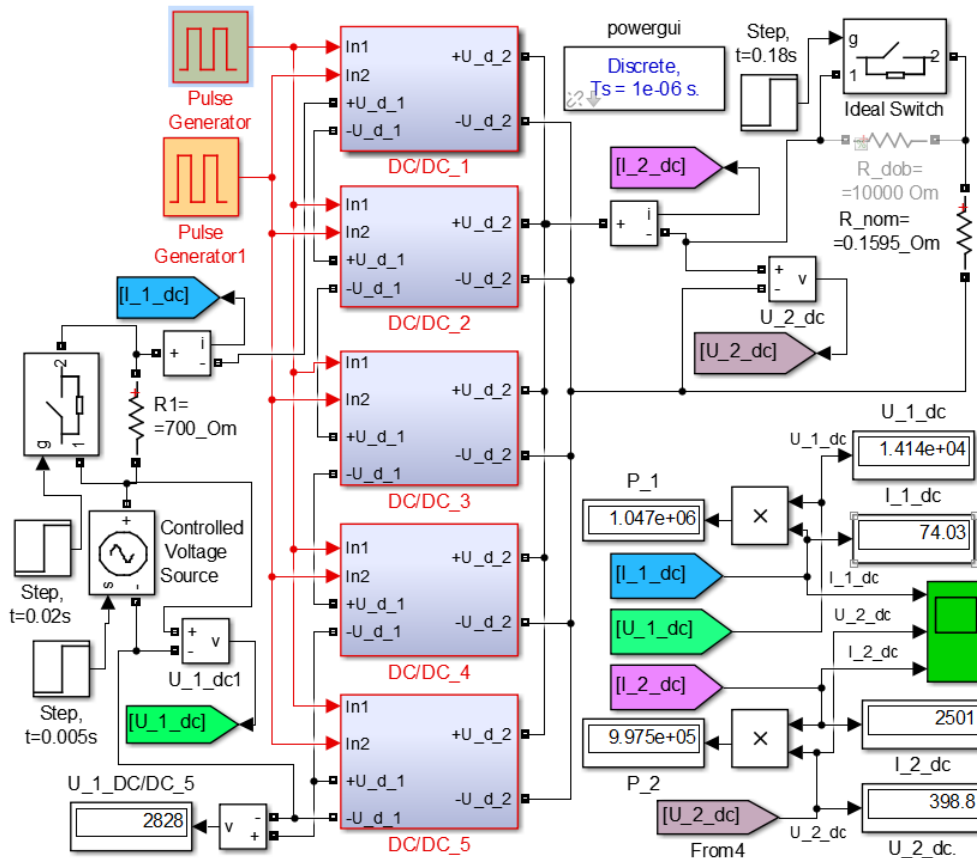


Рис. 1. Модель среднечастотного силового полупроводникового трансформатора напряжения постоянного тока (DC/DC)

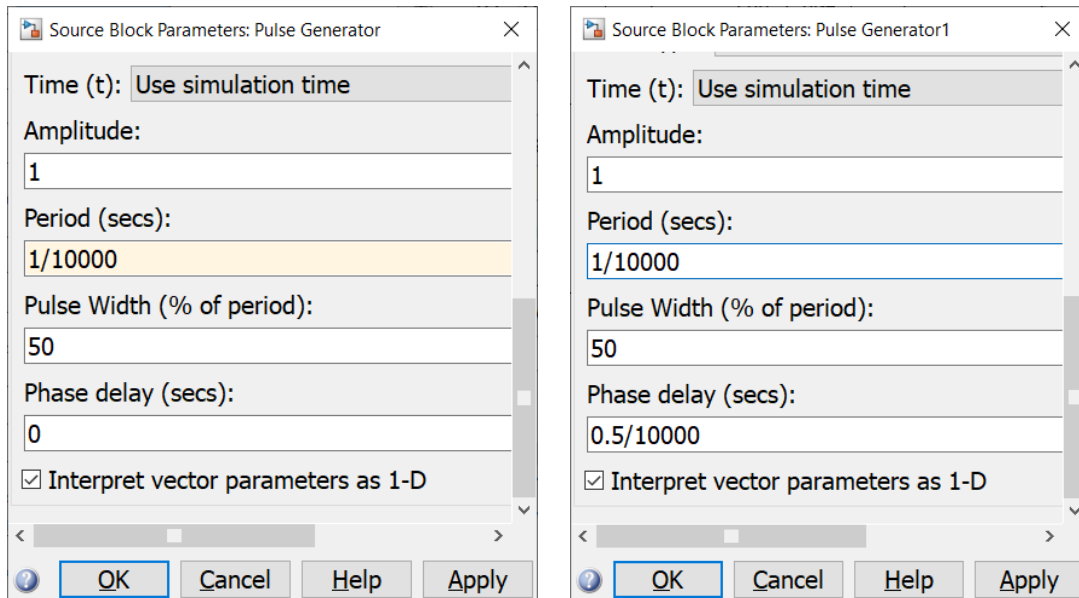


Рис. 2. Окна параметров генераторов импульсов

Блоки, которые относятся к этому трансформатору, на рис. 1 представлены в красном обрамлении, с красными линиями сигналов и надписями, т.е. это два блока Pulse Generator и пять ячеек (подфункций) DC/DC_1-DC/DC_5.

Окна параметров двух блоков генераторов импульсов представлены на рис. 2. Следует подчеркнуть, что во втором генераторе в поле Phase delay (secs) задано значение 0.5/10000. Эти генераторы подают импульсы на транзисторы IGBT инверторов всех ячеек.

Вход среднечастотного полупроводникового трансформатора (DC/DC) подключен к сети, реализованной в виде управляемого блока источника напряжения Controlled Voltage Source. Постоянное напряжение величиной задается в блоке Step $t=0.005s$, здесь $0.005s$ – время подачи напряжения на схему модели. Блок Step, $t=0.05s$ подает сигнал на срабатывание блока Ideal Switch⁵, что приводит к шунтированию пускового сопротивления $R1=700_{\Omega}$. Это сопротивление введено в цепь источника напряжения постоянного тока с целью ограничения затухающего колебательного процесса с ударным током в $278.7 A$, вызванного наличием в цепи незаряженных конденсаторов.

К выходу полупроводникового трансформатора подключена номинальная нагрузка в виде блока резистора $R_{nom}=0.1595_{\Omega}$. Время наброса нагрузки задается с помощью блока Step, $t=0.14s$, который подает сигнал на срабатывание блока Ideal Switch.

В правом нижнем углу представлены дисплеи и осциллограф, на которые выводятся соответствующие напряжения, токи и мощности на входе и выходе полупроводникового трансформатора напряжения постоянного тока.

Содержание блока (подфункции) ячейки трансформатора DC/DC_1 представлено на рис. 3. Содержание остальных ячеек (DC/DC_2-DC/DC_5) идентично.

⁵ Название блока скрыто.

На входе ячейки имеется L-фильтр для ограничения пускового тока и сглаживания пульсаций тока при работе инвертора, реализованного на транзисторах IGBT-IGBT_3. К инвертору подключен среднечастотный линейный трансформатор Linear Transformer, к выходу которого подключен выпрямитель.

Окна параметров транзисторов IGBT и среднечастотного трансформатора Linear Transformer представлены на рис. 4,а и рис. 4,б соответственно. Здесь значения параметров среднечастотного трансформатора, размерность которых указана в относительных единицах, соответствуют значениям, которые заданы в блоке трансформатора по умолчанию. Остальные параметры, заданные в именованных единицах, были рассчитаны и внесены в соответствующие поля окна параметров.

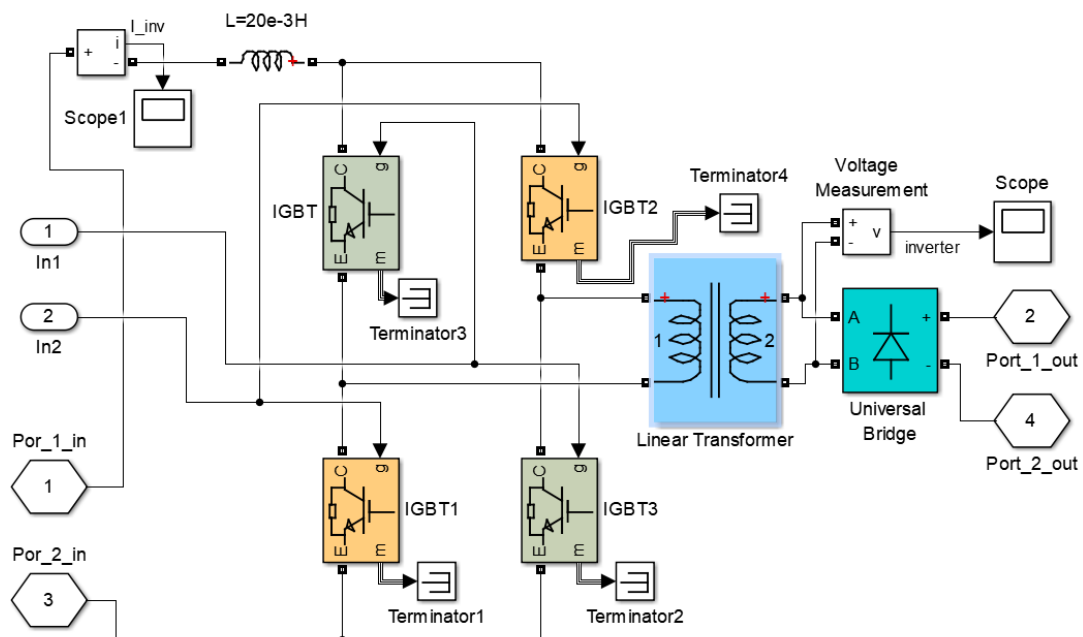


Рис. 3 Ячейка (подфункция) DC/DC_1 среднечастотного силового полупроводникового трансформатора постоянного тока мощностью 200 кВт, напряжением 2828/400 В

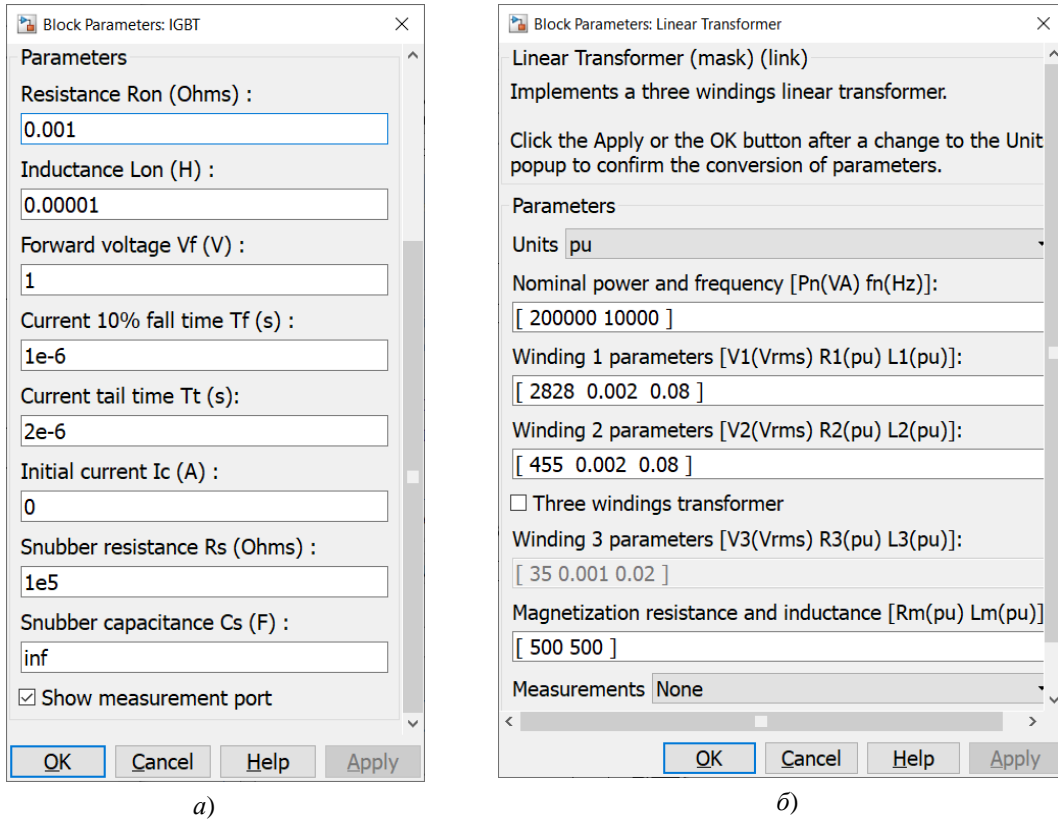


Рис. 4. Параметры транзисторов IGBT и среднечастотного трансформатора ячейки

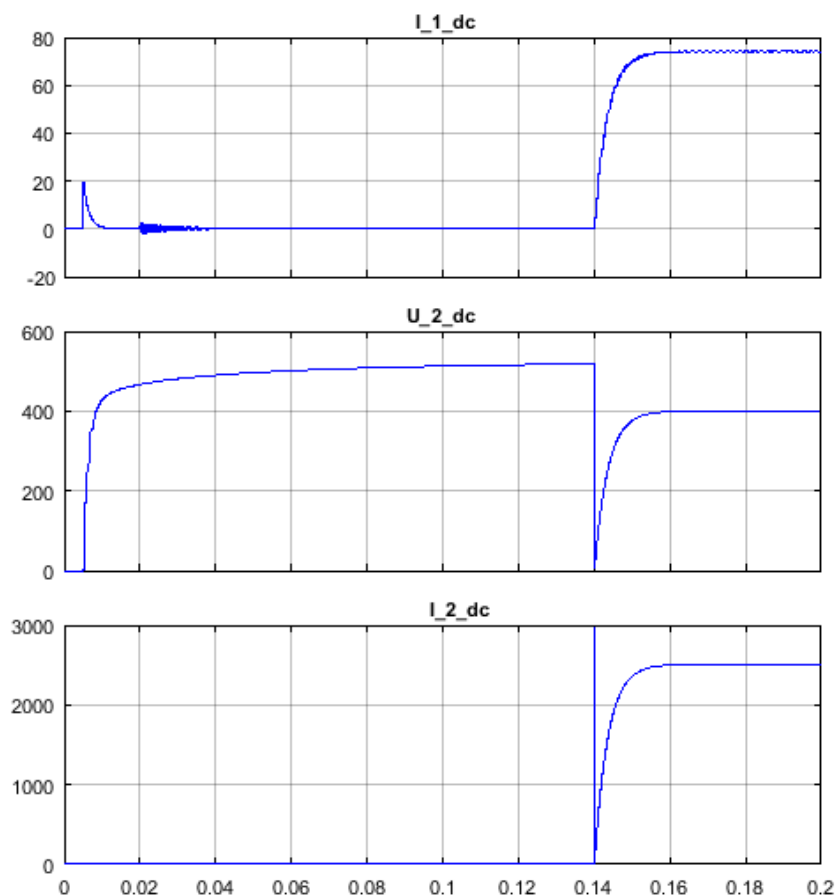


Рис.5. Переходные процессы при включении и набросе нагрузки с номинальным сопротивлением $R_{nom} = 0.1595 \text{ Ом}$

Результаты моделирования переходных процессов в полупроводниковом трансформаторе постоянного тока в виде соответствующих кривых представлены на рис. 5. После подключения полупроводникового трансформатора к сети, в момент времени $t = 0.005 \text{ с}$ (см. блок Step, $t=0.005\text{s}$) возникает относительно небольшой бросок тока, равный $i_{1_{dc}} = 19,8\text{А}$, который меньше номинального в $19.8/74.21 = 0.267$ раза. Следует отметить, что при отсутствии пускового сопротивления $R1=700_{\text{Ом}}$ аналогичное отношение равно $278.7/74.21 = 3.76$.

При $t = 0.14 \text{ с}$ наброс нагрузки приводит к снижению вторичного напряжения с $u_{2_{dc}} = 518.3 \text{ В}$, которое имеет место в режиме холостого хода, до минимального значения $u_{2_{dc_min}} = 5 \text{ В}$. Затем напряжение плавно возрастает до установившегося номинального значения 400.2 В . При этом возникает бросок тока, но уже во вторичной цепи трансформатора величиной $i_{2_{dc}} = 2967.9 \text{ А}$, что превышает номинальный в $2967.9/2510 = 1.18$ раза. После этого максимума ток снижается до нуля, а в дальнейшем, как и напряжение, возрастает до установившегося номинального значения, т.е. до 2510 А .

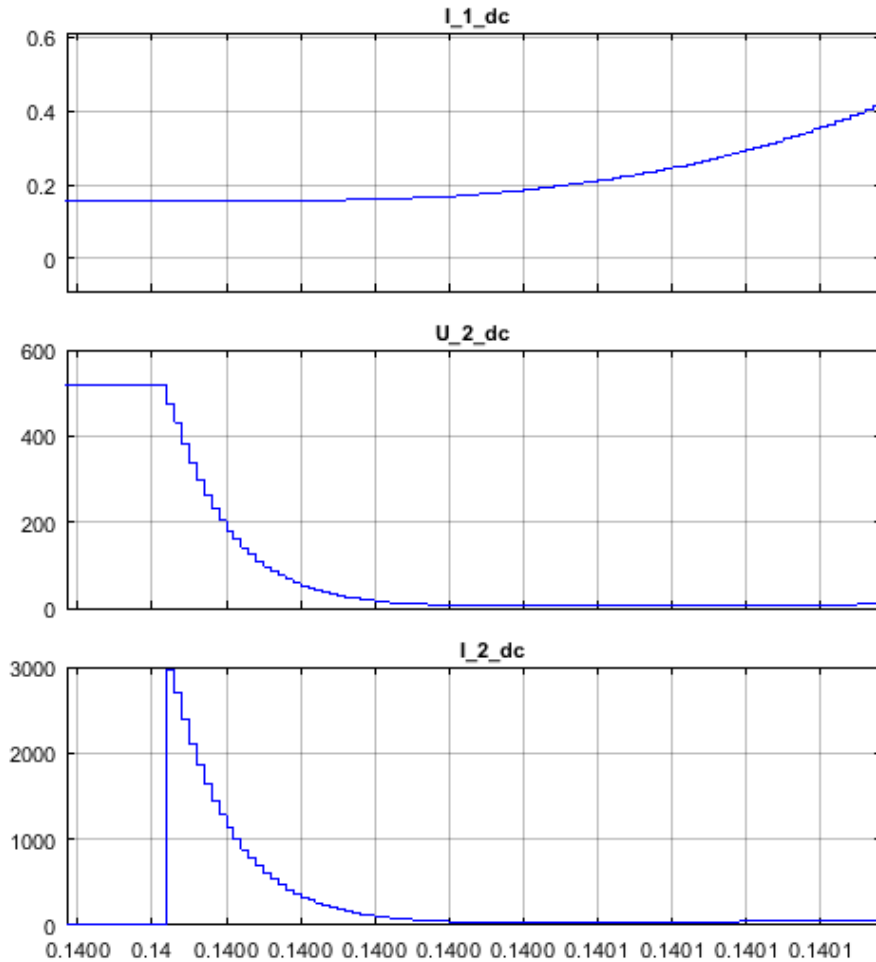


Рис. 6. Наброс нагрузки с номинальным сопротивлением $R_{nom} = 0.1595 \text{ Ом}$

Следует отметить, что при набросе номинальной нагрузки изменение напряжения на выходе трансформатора относительно напряжения холостого хода составляет $\Delta U_{2_dc} = (518.3 - 400.2)/518.3 = 22.8\%$, что выходит за рамки стандарта. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже в ходе анализа работы инвертора.

При более детальном рассмотрении кривых на интервале времени возле точки $t = 0.14 \text{ с}$ (рис. 6) видим, что после броска ток в нагрузке плавно уменьшается во времени. Значение напряжения на нагрузке также плавно уменьшается. Следует подчеркнуть, что в момент наброса нагрузки ток мгновенно возрастает, при этом напряжение почти не изменяется. Такое поведение свидетельствует о преобладании в замкнутой цепи полупроводникового трансформатора и нагрузки емкостных элементов над индуктивными. Таким образом, при набросе нагрузки происходит разряд конденсаторов полупроводникового трансформатора.

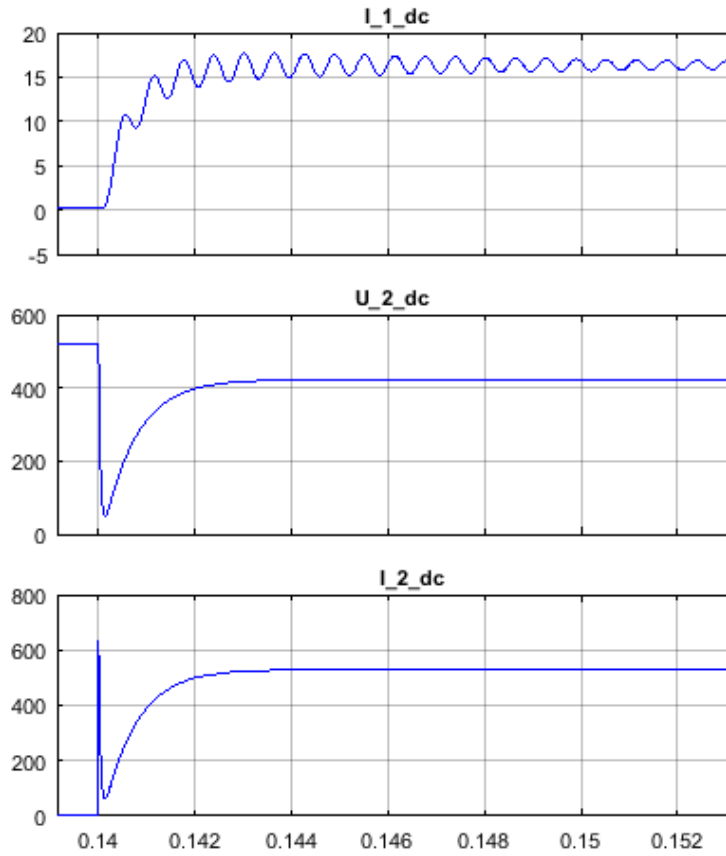


Рис. 7. Наброс нагрузки при $R = 5R_{nom} = 0.7975 \text{ Ом}$

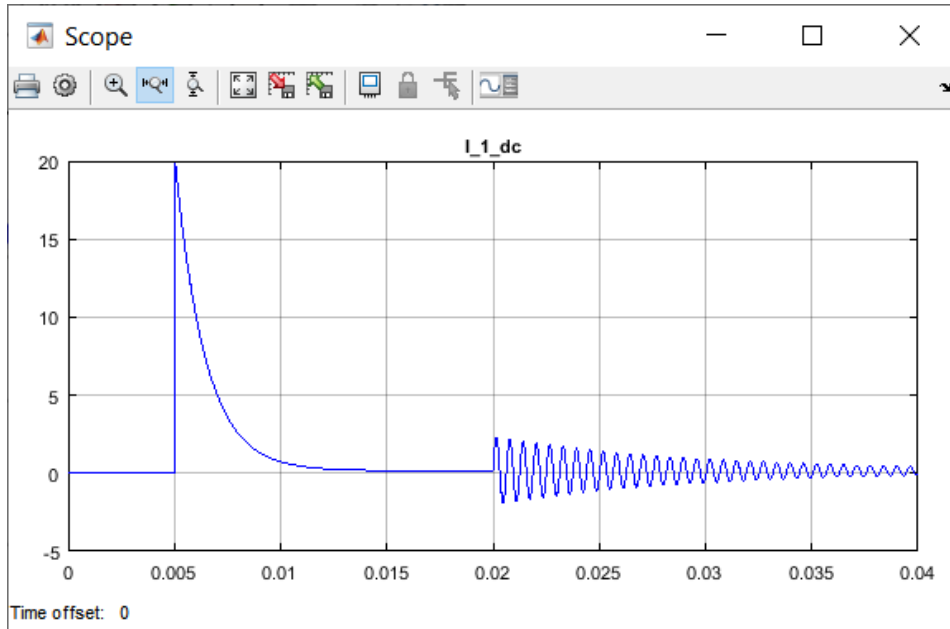


Рис. 8. Затухающий колебательный процесс на входе полупроводникового трансформатора при подключении к сети

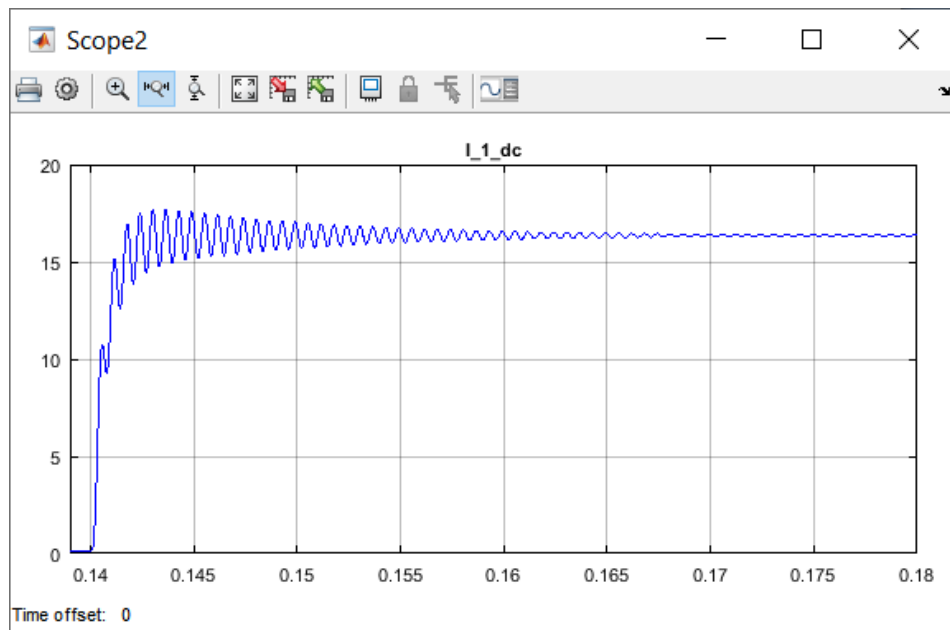


Рис. 9. Затухающий колебательный процесс при набросе нагрузки

Следует отметить, что пятикратное увеличение сопротивления нагрузки приводит к тому, что напряжение снижается только до $u_{2_dc_min} = 50V$, а не $5V$ (рис. 7). При

броске тока его пиковое значение достигло только 637.8 А, а минимальное – составило 62.66 А, а не ноль, как в предыдущем случае (рис. 5 и рис. 6).

Кроме этого в кривой первичного тока возникают затухающие колебательные процессы, как при подключении полупроводникового трансформатора (рис. 8), так и при набросе нагрузки (рис. 9). Как видно из кривых на рис. 8 амплитуды затухающих колебаний относительно малы (менее 2.5 А) и не представляют угрозы для полупроводникового трансформатора.

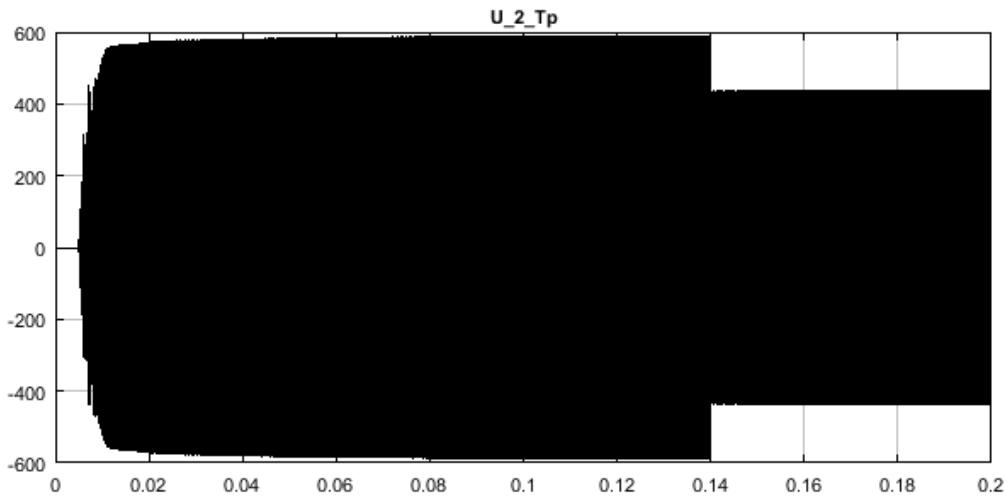


Рис. 9

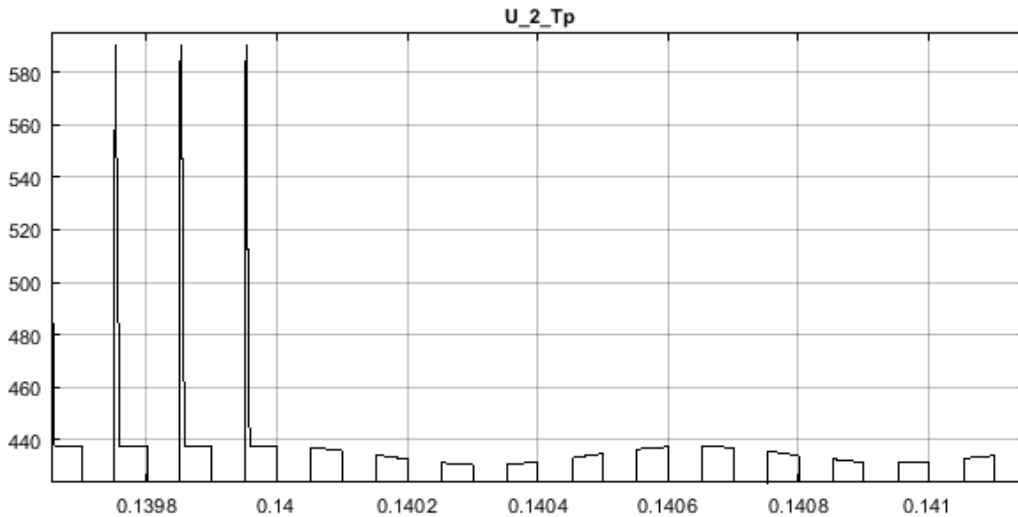


Рис. 10

Кривые переменного напряжения на вторичной обмотке трансформатора ячейки (подфункции DC/DC_1 (рис. 2) представлены на рис. 9 и рис. 10. Они свидетельствуют не только о работе среднечастотного трансформатора, но и работе инвертора.

По результатам, представленным на рис. 9, можно судить только об огибающей напряжения, что связано со значительной плотностью выводимой кривой напряжения, которая изменяется с частотой 10000 Hz . На этом рисунке виден процесс нарастания амплитуды напряжения, ее значение в установившемся режиме холостого хода, а также изменение амплитуды при набросе нагрузки.

На рис. 10 в узком интервале времени представлена часть периодически меняющейся кривой напряжения, которая в идеале должна иметь прямоугольную форму, которую изначально генерирует инвертор. Однако на этом рисунке видны искажения кривой при работе на холостом ходу и их отсутствие под нагрузкой. С учетом этого, для устранения пульсаций на холостом ходу параллельно сопротивлению нагрузки подключим балластное сопротивление величиной $R_{bal} = 100 \text{ Ohm}$ или нагрузку с аналогичным сопротивлением. При этом мощность, которая будет выделяться на этом сопротивлении при номинальном напряжении, равна $(400)^2/100 = 1600 \text{ W}$, что составляет $0,16\%$ от номинальной мощности. После подключения к сети полупроводникового трансформатора балластное сопротивление R_{bal} может быть отключено. В данном случае изменение напряжения при подключении номинальной нагрузки составило $\Delta U_{2_{dc}} = (437.4 - 400)/437.5 = 8.57\%$, что находится в стандартном диапазоне, т.е. $\pm 5\%$ от номинального напряжения.

Таким образом, использование балластного сопротивления или минимальной нагрузки перед включением полупроводникового трансформатора позволило снять вопросы с перенапряжением в 518.3 В и значительным изменением напряжения при набросе нагрузки, которое равнялось 22.8% (См. первый абзац после рис. 6).

Выводы

1. Разработанная модель среднечастотного полупроводникового трансформатора напряжения постоянного тока может быть использована для исследования переходных процессов.
2. На холостом ходу напряжение постоянного тока на выходе полупроводникового трансформатора имеет завышенное значение из-за наличия бросков в кривой напряжения переменного тока на выходе среднечастотного трансформатора, расположенного в секции. Для устранения этой проблемы перед пуском необходимо подключить к выходу трансформатора балластное сопротивление или нагрузку, на которых будет выделяться мощность более $0,16\%$ от номинальной.
3. При подключении полупроводникового трансформатора к сети постоянного тока необходимо использовать пусковое сопротивление, для ограничения броска тока, связанного с наличием в электрической цепи полупроводникового трансформатора незаряженных конденсаторов.

Dzhendubaev E.A.-Z. Development of a model of a power solid state voltage transformer of a DC distribution network

Summary: A model of a power solid state DC voltage transformer developed in the MATLAB/SimPowerSystems system is presented, which includes five similar cells (subsystems) with a medium-frequency inverter, a two-winding single-phase medium-frequency AC transformer, and a single-phase bridge rectifier with a filter. The results of simulation of transient processes when connecting a solid state transformer to a DC electrical network and stepwise load changes are presented.

Keywords: solid state transformer, direct current, inverter, rectifier, direct current network.

Список использованных источников и литературы

1. Зотин О.Т. В преддверии возрождения постоянного тока// Силовая Электроника, № 4'2013, Часть 1. URL: <https://power-e.ru/electroenergetics/direct-current-1/>
2. Джендубаев А.-З.Р., Кононов Ю.Г., Джендубаев Э.А.-З. Электроэнергетика будущего: инверторные технологии и постоянный ток // Энергия единой сети. 2020. №4. С. 50-61. URL: <https://www.энергия-единой-сети.рф>
3. Johann W. Kolar Solid State Transformer (SST) Applications – A Glimpse Into the Future. Nov. 19, 2019. Режим доступа: www.pes.ee.ethz.ch
4. MATLAB. Режим доступа: <http://https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
5. Худяков В.Ф. Моделирование источников вторичного электропитания в среде MATLAB 7.X / В.Ф. Худяков, В.А. Хабузов. – СПб.: ГУАП, 2008. – 332 с.

Джендубаев Эдуард Абрек-Заурович – аспирант Инженерного института Северо-Кавказского федерального университета. E-mail: ygeege@mail.ru.

CONTENTS

HUMANITIES AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Daurova A.B. On the typology of foreign accent	3
---	---

TECHNICS

Erkenov N.H., Chernousova L.V. Theoretical evaluation of the accuracy and convergence of the combined method for calculating the electromagnetic field in axisymmetric systems.....	8
Kyatov N.H. Influence of the variability of the working area of the sample on the strength characteristics of the soil.....	13
Dzhendubaev E.A.-Z. Development of a model of a power solid state voltage transformer of a DC distribution network.....	21

Правила оформления статей в журнал «Известия СКГА» и
соответствующие шаблоны размещены на сайте академии по адресу:
<http://ncsa.ru/page/content/nauchno-prakticheskii-i-uchebno-metodicheskii-zhurnal-izvestija-sevkavgta.html>

ОСНОВНЫЕ РУБРИКИ ЖУРНАЛА

ГУМАНИТАРНЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИСКУССТВО

МАТЕМАТИКА, ФИЗИКА И
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

МЕДИЦИНА

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭКОНОМИКА

ЮРИСПРУДЕНЦИЯ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ЮБИЛЕИ