

АНАЛИЗ МАТРИЦЫ КОММУТАЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЧАСТИЧНЫХ ЕМКОСТЕЙ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МНОГОЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ МЕТОДОМ СОВОКУПНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Беспрозванных А.В., доц., к.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21 кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"

тел. (057) 70-10-60, e-mail: Bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

При застосуванні метода сукупних вимірювань часткові ємності та тангенси кута діелектричних втрат знаходяться за результатами рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. При обстеженні багатожильних кабелів необхідно виконати багато вимірювань. Для зменшення впливу оточуючого середовища на результати вимірювань та скорочення часу достатньо проаналізувати матрицю коефіцієнтів, яка дозволяє отримати рішення системи.

При примененні метода сукупних измерений частичные емкости и тангенсы угла диэлектрических потерь находятся в результате решения системы линейных алгебраических уравнений. При обследовании многожильных кабелей число опытов резко возрастает. Для уменьшения влияния окружающей среды на результаты измерений и времени проведения эксперимента достаточно выполнить анализ матрицы коммутации, обеспечивающей решение системы.

ВВЕДЕНИЕ

При технической диагностике кабелей в промышленных условиях измеряемые значения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь не отражают истинные параметры контролируемых цепей. Это обусловлено электрическим влиянием рядом расположенных работающих объектов. В результате значения емкости оказываются завышенными. При обследовании кабелей в лабораторных условиях длина образцов не превышает 10 метров, т.е. измеряемые емкости не превышают сотен пФ. Как в первом, так и втором случаях на фоне помех и малых значений емкости образцов, сложно заметить истинные изменения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь, обусловленные процессами старения, проникновения влаги внутрь сердечника кабеля. Для повышения точности и достоверности результатов измерений применяется метод совокупных измерений [1-7]. Метод реализуется с помощью приборов с двумя клеммами. При использовании прибора с тремя клеммами заземляющий третий электрод не используется [7]. Суть метода состоит в том, что между объектом и измерителем (И) помещается двухпозиционный коммутатор (К) (рис. 1). С его помощью каждый из полюсов объекта контроля (жилы, металлический экран, оболочка) подключается либо к одному ("0"), либо к другому ("1") входу измерителя. Частичные емкости, подключенные к одному и тому же входу измерителя, оказываются закороченными, т.е. не влияют на результаты измерений. Частичные емкости, подключенные к разным входам, оказываются включенными параллельно. При каждом сочетании положения ключей коммутатора измеряются совокупные (общие) емкость ($C_{изм}$) и тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta_{изм}$) ряда отдельных частичных емкостей, включенных параллельно. Параметры контролируемой цепи в этом случае находятся не непосредственно в ходе измерений, а в результате решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$AC * Cx = C_{изм}, \quad (1)$$

$$ATG * TG_x = TG_{изм}, \quad (2)$$

где $C_{изм}$ и $TG_{изм}$ – матрицы - столбцы результатов измерений совокупных емкостей и $tg\delta$ (результат совокупного действия ряда частичных емкостей с потерями, включенных параллельно); Cx , TG_x – матрицы-столбцы неизвестных истинных значений частичных емкостей и $tg\delta$ частичных емкостей с потерями; AC – матрица коэффициентов (матрица "участия" частичных емкостей в образовании общей емкости данного опыта); ATG – матрица коэффициентов, подобная по структуре матрице AC , но содержащая вместо единичных коэффициентов - дроби, в числителе которых частичные емкости C_{ij} , найденные в результате решения (1), а в знаменателе – суммы частичных емкостей, участвующих в данном опыте. Коэффициенты матрицы ATG определяют долевые вклады реальных частичных емкостей (с потерями энергии) в суммарных потерях данного опыта. Знак "*" - матричное умножение.

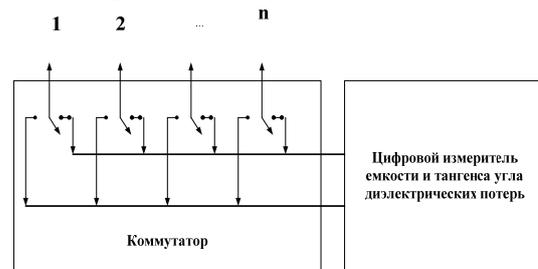


Рис. 1. Схема обследования многожильных кабелей методом совокупных измерений с помощью измерителя иммитанса с двумя входами (без экранирующего провода)

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В кабеле, состоящем из n полюсов, образуется N изоляционных промежутков (частичных емкостей):

$$N = n \cdot (n - 1) / 2. \quad (3)$$

Для нахождения параметров всех N промежутков требуется выполнить не менее N измерений. Общее число вариантов подключений составляет:

$$M = (2^n - 2) / 2, \quad (4)$$

которые можно выполнить C_M^N способами. При этом матрица коммутации AK , элементы которой равны

"1" при подключении клеммы объекта, например, к левому входу прибора и "0" при подключении к правому, при каждом способе подключения будет разной. Так, при обследовании 5-ти полюсника число частичных емкостей равно 10, число вариантов подключений достигает 15. Эти подключения можно выполнить 3003 различными способами. При обследовании 15-полюсника число частичных емкостей составляет 105, а число опытов -16383, которые можно выполнить C_{16383}^{105} способами (табл. 1).

Таблица 1

Соответствие между числом частичных емкостей и полным планом эксперимента

n - число полюсов объекта контроля (токопроводящих жил)	5	10	15	27
N - число частичных емкостей (изоляционных промежутков)	10	45	105	351
M - число вариантов подключения (полных опытов)	15	511	16383	6710886
P - число способов подключения полюсов к двухпозиционному коммутатору	3003	$8.69 \cdot 10^{+64}$	C_{16383}^{105}	$C_{6710886}^{351}$

Практическая реализация полного плана эксперимента возможна для кабелей с числом жил не более 5. Для этого достаточно выполнить 15 опытов и решить СЛАУ 15-го порядка. При обследовании 15-жильного кабеля число полных опытов возрастает более, чем в 1000 раз. Приходится решать СЛАУ 16383-го порядка.

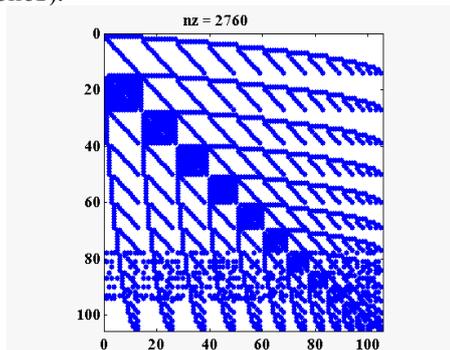
Для нахождения частичных емкостей многожильных кабелей достаточно провести число опытов, равное числу изоляционных промежутков. Однако при выбранном способе подключения (матрицы коммутации - матрицы потенциалов вершин многополюсника), может оказаться, что СЛАУ вырождена или плохо обусловлена. Другими словами, система (1) не имеет решения [8-11]. Выбор вариантов подключения (матрицы коммутации) из множества возможных представляет собой сложную проблему, к тому же имеющую неоднозначные решения (в зависимости от геометрии изделия и соотношений частичных емкостей). При увеличении числа полюсов n сложность выбора резко возрастает. Таким образом, проблема решения СЛАУ при числе опытов, равных числу частичных емкостей, сводится к анализу матрицы коммутации.

Цель статьи – анализ оптимальных схем опыта (матрицы коммутации) при подключении многожильных кабелей к двухпозиционному коммутатору, приводящих к решению системы линейных алгебраических уравнений.

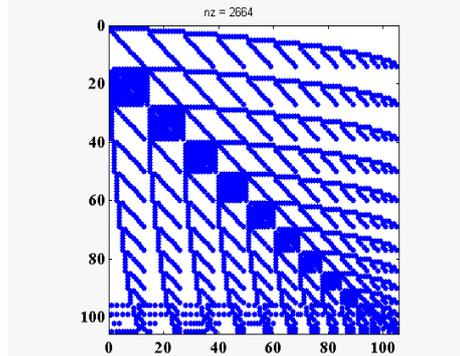
ВЫБОР СХЕМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ МНОГОПОЛЮСНИКОВ

При обследовании многожильных кабелей для каждого типа многополюсника необходимо "составить" план полного проведения опытов – схему подключения полюсов объекта к двухпозиционному коммутатору, например, в виде простого кода Грэя. Полученная схема представляет собой матрицу коммутации. Она содержит n строк (по числу полюсов) и M столбцов (по числу полных опытов). Анализ схем подключения, которые приводят к решению СЛАУ (рис. 2), можно выполнить прямым перебором всех способов P или случайным выбором отдельных вариантов. Перебор всех способов выполняется с помощью инкапсулированных, вложенных друг в друга (типа матрешки) циклов. Во втором случае вектор случайно расположенных чисел от 1 до M получается с применением команды случайной перестановки (randperm). Выделяя из него первые N элементов и размещая их в порядке возрастания с помощью оператора sort($V(1:N)$), получаем оптимальную схему проведения опыта Vort [12-13].

Первый способ целесообразен при относительно небольшом числе вариантов (несколько тысяч), второй – в случае большого числа вариантов (десятки миллионов).



а) СЛАУ не имеет решения (det = 0; Cond = 1.5947e+018)



б) СЛАУ имеет решение

(det = -2.4759e+027; Cond = 422.8953)

Рис. 2. Матрица коэффициентов 15-полюсника при реализации 105 опытов при разных схемах подключения

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве тестового объекта выбран силовой кабель АСБ2л-3х70-1х35 с четырьмя секторными алюминиевыми жилами. Три жилы сечением 70 мм² и одна сечением 35 мм² (рис. 3). Изоляция жил выполнена на основе пропитанной кабельной бумаги. Жилы помещены в общую свинцовую оболочку, поверх которой

наложена броня в виде двух стальных лент. Кабель в течение длительного времени находился на открытом воздухе (на улице) в не рабочем состоянии. В таком 5 – полюснике -неоднородном по конструкции – выделяется 10 частичных емкостей, связи между которыми в виде графа расстояний, соответствующих ожидаемым частичным емкостям (чем ближе расположены, тем больше емкость), представлены на рис. 4.

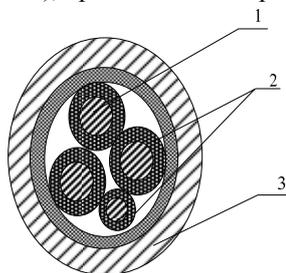


Рис. 3. Конструкция силового кабеля АСБ2л-3х70+1х35: 1 – алюминиевые токопроводящие жилы; 2 – изоляция на основе пропитанной кабельной бумаги; 3 –свинцовая оболочка

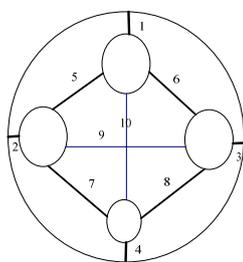


Рис. 4. Граф расстояний между частичным емкостями в кабеле АСБ2л-3х70+1х35- 1 кВ
1-4 – частичные емкости проводников на свинцовую оболочку; 5-8 – частичные емкости соприкасающихся проводников; 9-10 – частичные емкости удаленных (не соприкасающихся) проводников

Полные измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь методом совокупных измерений были выполнены в соответствии с матрицей коммутации:

$AKs = [$

% потенциалы вершин многополюсника
% (вектор V)

%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
%	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
%	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
%	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
%	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

];

Матрица содержит 5 строк (по числу полюсов объекта - 4 проводника и свинцовая оболочка) и 15 столбцов (по числу всех возможных вариантов состояния ключей коммутатора). Свинцовая оболочка в данном случае всегда была подключена к "0" входу измерителя. Это необходимо для исключения ее влияния на результаты измерений [14]. По результатам полных опытов в результате решения переопределенной СЛАУ (1) и (2) были найдены истинные значения частичных емкостей и tgδ частичных емкостей с потерями (рис. 5).

По результатам случайного перебора комбинаций схем были выбраны вектора V, которые приводят к ненулевым определителям матрицы коэффициентов AC (табл. 2) и обеспечивают проведение не 15, а только 10 вариантов подключений. Общее число оптимально - возможных подключений 5-полюсника составило около 12% из 100 000 проанализированных вариантов.

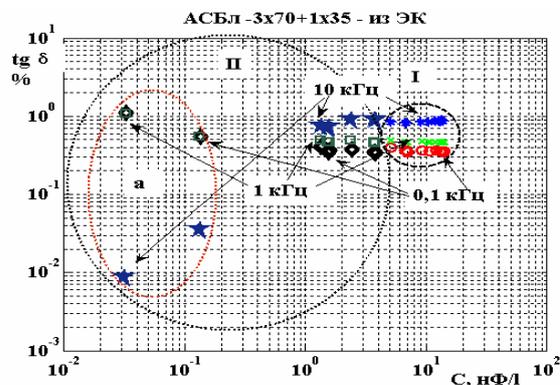


Рис. 5. C - tgδ диаграмма кабеля АСБ2л-1х70+1х35 -1 кВ
I – частичные емкости и tgδ при совокупных измерениях
II – восстановленные значения по результатам 15 опытов

Таблица 2

Фрагменты оптимального вектора V (схемы подключения) 5-полюсника

Схема подключения (Vopt)	det	Cond
3 4 5 9 10 11 12 13 14 15	64	16.0964
1 2 4 5 6 7 11 12 13 14	64	21.1089
1 2 3 4 6 7 8 10 13 14	-64	19.7152
4 6 7 8 9 10 11 12 13 15	-64	13.8953
1 3 5 6 9 10 11 12 13 15	128	11.2311
1 2 5 7 8 9 11 12 13 14	-128	10.5424

Результаты восстановленных значений частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь представлены на рис. 6-7. Наименьшая погрешность соответствует большим значениям восстановленных частичных емкостей (область I - наиболее близко расположенные проводники, рис. 4, частичные емкости 1-3, 5-6). Наибольшая - для малых значений частичных емкостей (область III), соответствующая наиболее удаленным проводникам (рис. 4, частичные емкости 9 и 10). При этом для частоты 0,1 кГц относительная погрешность максимальная и составляет порядка 9%, для частот 1 и 10 кГц – около 6%. Более высокие значения погрешности для частоты 0,1 кГц обусловлены, очевидно, влиянием второй сетевой гармоники и особенностями цифрового прибора – измерителя иммитанса [7]. Тангенс угла диэлектрических потерь отличается в 4 раза в зависимости от выбранной схемы подключения. Такое сильное расхождение обусловлено, в первую очередь тем, что при разных выбранных схемах подключения полюсов к коммутатору поле "зондирует" разные участки поперечной структуры кабеля.

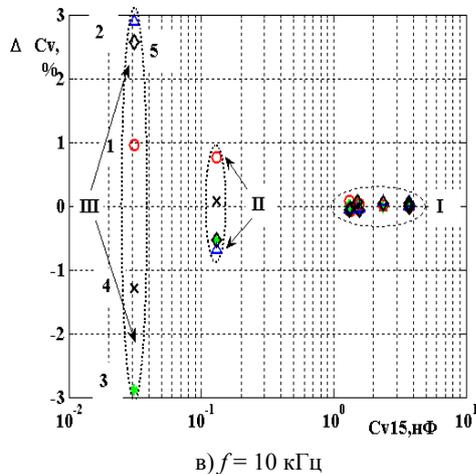
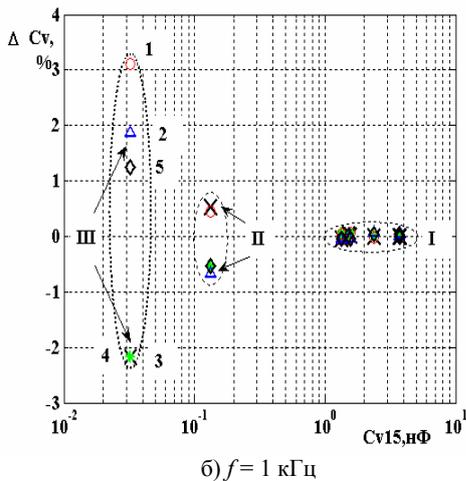
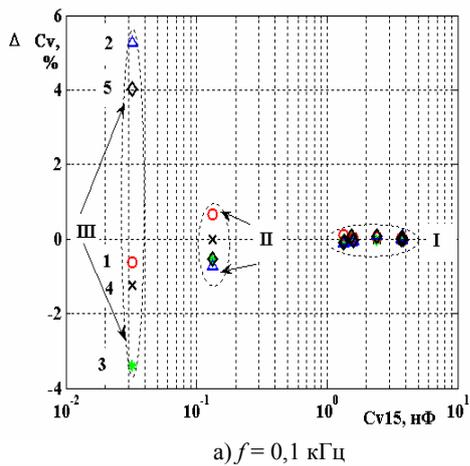


Рис. 6. Влияние детерминанта и числа обусловленности матрицы участия частичных емкостей на погрешность восстановленных значений частичных емкостей 5-полюсника (сравнение относительно полного эксперимента - 15 опытов)

- 1- det=64; Condmin=8.9592; Vopt=[2 3 4 6 7 8 12 13 14 15];
- 2 - det=64; Condmax=23.0718; Vopt=[3 5 7 8 9 10 11 12 13 14];
- 3- det=64; Cond=9.1654; Vopt=[1 3 4 5 7 11 12 13 14 15];
- 4 - det=128; Cond=11.2311; Vopt=[1 3 5 6 9 10 11 12 13 15];
- 5 - D=-192; Cond=5.5016; Vopt=[1 3 4 5 6 7 8 9 11 13]

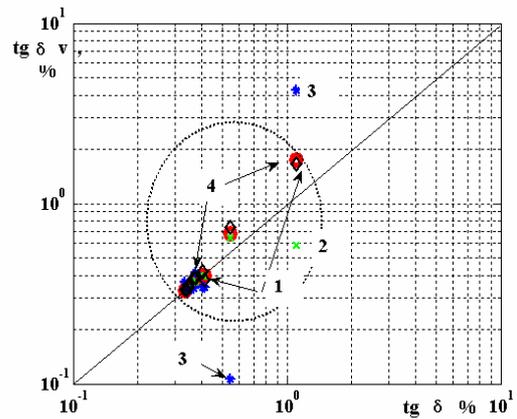


Рис. 7. Корреляционная зависимость между восстановленными значениями $\text{tg} \delta$ по результатам 15 (по горизонтали) и 10 оптимальных (по вертикали) опытов (частота 0,1 кГц)
 1- det = -192; Cond=5.5016; Vopt=[1 3 4 5 6 7 8 9 11 13];
 2- det=128; Cond=11.2311; Vopt = [1 3 5 6 9 10 11 12 13 15];
 3 - det=64; Condmax=23.0718; Vopt=[3 5 7 8 9 10 11 12 13 14];
 4 - det=64; Condmin=8.9592; Vopt=[2 3 4 6 7 8 12 13 14 15]

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СХЕМ ОПЫТА С НУЛЕВЫМ ДЕТЕРМИНАНТОМ

При схемах опытов, не имеющих решения, восстановление частичных емкостей выполняется методами регуляризации по Лаврентьеву М.М. Для корректного применения метода регуляризации необходимо, чтобы матрица коэффициентов была симметричной. С этой целью правая и левая части уравнения (1) умножаются на транспонированную матрицу AC' :

$$AC' * AC * Cx = AC' * C_{\text{изм}} \quad (5)$$

Затем, решается СЛАУ, диагональные элементы которой на сотые доли (в зависимости от числа полюсов и точности измерений) увеличены:

$$(AC' * AC + \alpha I) * C_x \approx AC' * C_{\text{изм}}, \quad (6)$$

где α - параметр регуляризации, I – единичная матрица (квадратная матрица с нулевыми элементами за исключением главной диагонали, на которой размещены единичные элементы). В результате решения (6) определяются частичные емкости объекта (рис. 8). Аналогично находят неизвестные значения тангенсов углов потерь частичных емкостей:

$$(ATG' * ATG + \alpha I) * TG_x \approx ATG * TG_{\text{изм}}, \quad (7)$$

ВЫВОДЫ

Восстановление частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь по результатам совокупных измерений дает возможность заметить ранние процессы старения изоляции жил, попадание влаги внутрь сердечника кабеля (рис. 5, II, область а), например, в результате повреждения оболочки. Но при этом СЛАУ, к которым сводится анализ результатов совокупных измерений многожильных кабелей (контрольных, телефонных), могут быть с нулевым детерминантом. Решение СЛАУ полностью зависит от матрицы коэффициентов. Выбор уравнений с ненулевым определителем можно выполнить прямым перебором всех способов или случайным выбором отдельных вариантов. Недостатком первого способа является

длительность перебора всех вариантов, второго – большое число повторных вариантов, которые необходимо отсортировать.

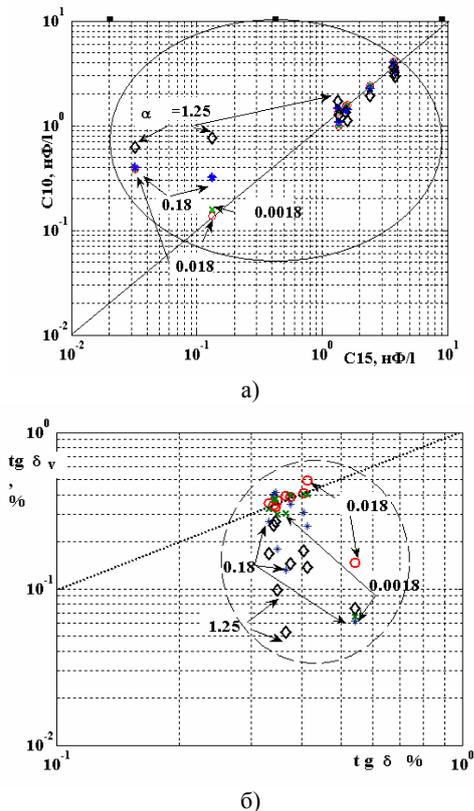


Рис. 8. Облако рассеяния восстановленных частичных емкостей (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) кабеля АСБ2л-3х70-1х35 - 1кВ по результатам 10 опытов относительно полных 15 при разных значениях параметра регуляризации (частота 0,1 кГц)
(det=0; Cond=8.2412 e+16; Vopt=[2 3 4 5 6 7 8 11 12 15])

Оптимальные планы обследования многожильных кабелей содержат столько неизвестных опытов, сколько частичных емкостей в объекте контроля. Проведение оптимальных планов приводит к сокращению объема и времени необходимых опытов в M/N раз. Так, при обследовании 5-полюсника в $15/10=1,5$ раза, 10 - полюсника - в 12; 15-полюсника – в 156; 27-полюсника – в 200 000 раз соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Чертков Г.Н., Нарыжная Р.Н. Оценка технического состояния многожильных кабелей АЭС по параметрам частичных емкостей //Тезисы докладов.
- [2] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Рудаков С.В. Контроль параметров изоляции трехфазных кабелей методом косвенных измерений.//Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ", №7. – 2002. - С. 103-108.
- [3] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей А.С. Определение параметров многоэлементных схем замещения сетевых кабелей.//Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ", №9. – 2003. - т.4, – 114 с.
- [4] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей А.С., Чертков Г. Н., Крикунов В. В. Наблюдение процессов старения изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей.//Конструкционная проч-

ность материалов. Международная конференция "Ресурс 2003". – Киев: ИПП НАНУ. - 2003.

- [5] Штангей А.С. Проблемы выбора оптимального плана эксперимента при обследованиях многожильных кабелей методом совокупных измерений.//Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ", №7. – 2004. - т.4, – С. 121-126.
- [6] Штангей А.С.Обследование многожильных кабелей методом совокупных измерений. Выбор оптимальных планов с помощью чисел обусловленности.//Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ", №22. – 2004.– С.117-120.
- [7] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей А.С., Радченко О.Н. Методика прямых измерений параметров частичных емкостей многожильных кабелей.// Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ", №42. – 2005. – С. 80-86.
- [8] Пизо Ш.,Заманский М. Курс математики. Алгебра и анализ - М.: Из-во "Наука", Главная редакция физико-математической литературы. 1971.-653 с.
- [9] Корн Г., Корн Т.Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.:Наука. 1973.
- [10] Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров – М.: Из-во "Наука", Главная редакция физико-математической литературы. 1967. -778 с.
- [11] Гантмахер Ф.Р. Теория матриц– М.: Из-во "Наука", Главная редакция физико-математической литературы. 1967. -575 с.
- [12] Дьяконов В.П. Matlab 6/6.1/6.5+Simulink 4/5® Основы применения. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс. 2004. – 767 с.
- [13] Иглин С.П. Математические расчета на базе MATLAB – Санкт-Петербург: "БХВ-Петербург". - 2005.-634 с.
- [14] Гоков А.П.Критерий выбора систем нелинейных алгебраических уравнений в задачах обследования кабелей методом совокупных измерений.// Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков: НТУ "ХПИ", №7. – 2006. - т.4, – С. 83-89.

Поступила 12.10.2006