

менты, колонны, монументы). При проецировании видеоролика посредством VideoMapping, содержащего в составе видеоряда, например, фейерверки, существует прекрасная возможность разделения сцены на передний, средний и задний планы, используя дополнительно реальные пиротехнические элементы ближнего и дальнего позиционирования.

Также существует возможность объединить в единый комплекс все существующие на сегодняшний день технологии для получения максимального эффекта зрелищности мероприятия.

### Литература

1. URL:<http://ledvizor.ru/>.
2. URL:<http://www.protone.ru/>.
3. URL:<http://www.malbred.com/video-proektsii/video-mapping-video-mepping.html>.



УДК 621.316

В.С. Куликовский, О.А. Ковалёва

### МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОММУТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВАКУУМНЫМИ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ

*Проведено математическое моделирование перенапряжений, возникающих при отключении двигательной нагрузки. Установлены зависимости уровней перенапряжений от параметров системы электроснабжения, момента коммутации, мощности нагрузки.*

**Ключевые слова:** электродвигатель, выключатель вакуумный, перенапряжение, уровень, параметр, момент, мощность, математическая модель.

V.S. Kulikovskiy, O.A. Kovaleva

### SWITCHING OVERVOLTAGE MODELING IN THE PROCESS OF SWITCHING THE HIGH-VOLTAGE ELECTRIC MOTORS BY THE VACUUM SWITCHES

*Mathematical modeling of the overvoltage arising when disconnecting the motor load is conducted. Dependences of the overvoltage levels on the power supply system parameters, switching moment, load power are determined.*

**Key words:** electric motor, vacuum switch, overvoltage, level, parameter, moment, capacity, mathematical model.

Одним из главных достижений в области развития коммутационной аппаратуры стала разработка и широкое внедрение выключателей в промышленное производство, в которых в качестве дугогасительной среды применялась шестифтористая сера SF<sub>6</sub> (элегаз) или вакуум. При этом элегазовые выключатели нашли применение в основном в электрических сетях напряжением 110 кВ и выше, а вакуумные – в электроустановках напряжение 6–35 кВ.

Предприятия горной промышленности стали одними из первых, где было начато широкое применение вакуумных выключателей, как в нашей стране, так и за рубежом. Это объясняется тем, что в тяжелых условиях эксплуатации на горных предприятиях ощутимо проявляются преимущества вакуумных выключателей перед другими типами коммутационной аппаратуры, а именно: высокая эксплуатационная надежность и коммутационная износостойкость, повышенная устойчивость к динамическим нагрузкам, полная пожаро- и взрывобезопасность, низкие эксплуатационные затраты, простота обслуживания, широкий диапазон температур окружающей среды [1,2].

В то же время широкое внедрение вакуумных выключателей в нефтяную, металлургическую и горнодобывающую промышленность привело к обострению проблемы коммутационных перенапряжений, созда-

ваемых этими аппаратами. При определенных сочетаниях начальных условий коммутации вакуумные выключатели могут создавать опасные для изоляции электрооборудования перенапряжения. Данная проблема особо проявляется для элементов сети с достаточно низким уровнем прочности изоляции: высоковольтные электродвигатели и гибкие кабели с резиновой изоляцией [2].

Решения задачи по снижению негативного воздействия коммутационных перенапряжений на изоляцию электрооборудования требует проведения сложных и дорогостоящих экспериментов на технологическом оборудовании предприятий с использованием измерительной аппаратуры, которая серийно не выпускается. В связи с этим важное практическое значение приобретает математическое моделирование коммутационных перенапряжений, так как оно позволяет исключить дорогостоящие экспериментальные исследования.

Величина коммутационных перенапряжений зависит от множества факторов, а именно: мощность и тип нагрузки; величина и полярность тока среза; величина волнового сопротивления; синхронность замыкания или размыкания полюсов контактов высоковольтного выключателя; тип коммутационного аппарата; отключающую способность по высокочастотному току; повторные зажигания дуги; качества ремонта статорной обмотки. Многие из этих факторов носят случайный характер и действуют в самых разнообразных сочетаниях. Учет всех этих факторов при аналитическом исследовании коммутационных перенапряжений является трудновыполнимой задачей. Поэтому важным моментом при аналитических исследованиях является адекватность схемы замещения участка электрической цепи «вакуумный выключатель – кабель – электродвигатель» высокочастотному импульсному переходному процессу (рис. 1).

Для моделирования предлагается однофазная схема замещения при условии симметричности фаз нагрузки (рис. 2).

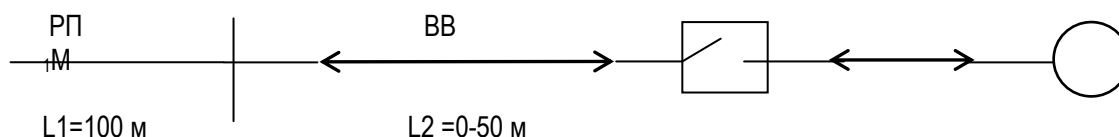


Рис. 1. Участок электрической сети «распределительный пункт – кабель ( $L_1$ ) – вакуумный выключатель – кабель ( $L_2$ ) – высоковольтный выключатель – двигатель М»

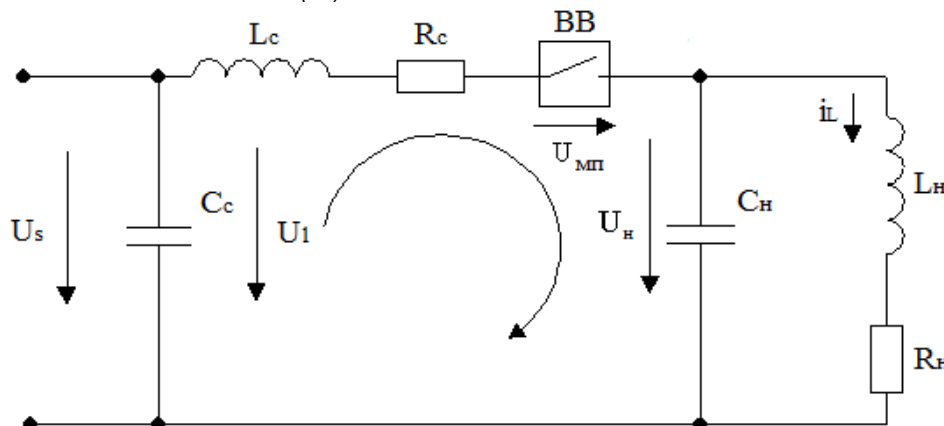


Рис. 2. Схема замещения участка электрической сети «распределительный пункт – кабель ( $L_1$ ) – вакуумный выключатель – кабель ( $L_2$ ) – высоковольтный выключатель – двигатель М»:  $C_c$  – емкость кабеля относительно земли от РП до вакуумного выключателя;  $C_n$  – емкость отключаемого участка сети;  $L_c$ ,  $L_n$  – индуктивности кабеля первого участка и нагрузки;  $R_n$  – активное сопротивление нагрузки;  $R_c$  – активное сопротивление кабеля от распределительного пункта до вакуумного выключателя; ВВ – вакуумный выключатель;  $U_s$  – напряжение сети;  $U_{мп}$  – напряжение в межконтактном промежутке выключателя;  $U_n$  – напряжение отключаемого контура

При математическом описании переходных процессов принимаем ряд допущений: междофазную емкость не учитываем в виду ее незначительности – 10% от емкости фазы на землю [3]; межвитковую емкость пренебрегаем, так как она учитывается для электродвигателей малой мощности;

обмотка электрической машины является линейной цепью, параметры которой не зависят от величины тока и напряжения;

в диапазоне частот 5–25 кГц индуктивность обмотки остается практически постоянной и определяется сверхпереходным индуктивным сопротивлением;

значение напряжения сети при частоте сети 50 Гц считаем квазипостоянной величиной, равной мгновенному значению напряжения в начальный момент переходного процесса;

ротор двигателя в момент коммутации является неподвижным;

потери в стали и диэлектрические потери в корпусной изоляции электродвигателя не учитываем, так как выполненные расчеты показали, что они составляют менее 1–3 % от номинальной мощности электрической машины.

В случае если после погасания дуги не возникнет повторное зажигание, то схема замещения на рисунке 2 примет вид, представленный на рисунке 3. Система уравнений, описывающая физические процессы, протекающие в данной схеме, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_R &= i_H \times R_H \\ u_L &= L_H \times \left( \frac{di_H}{dt} \right) \\ u_L + u_R + u_H &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} i_H &= i_C \\ i_H &= C_H \times \left( \frac{du_H}{dt} \right) \end{aligned} \right\}$$

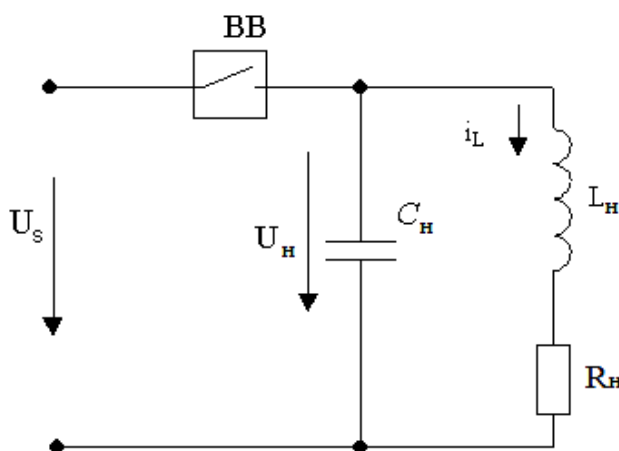


Рис. 3. Схема замещения без учета повторных зажигания дуги

Из системы уравнений определяем выражения для напряжения на нагрузке:

$$i_L = -L_H \times C \times \left( \frac{d^2 i_L}{dt^2} \right) - R_H \times C_H \left( \frac{di_L}{dt} \right), \quad (2)$$

$$L_H \times C_H \times \left( \frac{d^2 U_H}{dt} \right) + R_H + C_H \times \left( \frac{dU_H}{dt} \right) + U_H = 0. \quad (3)$$

Заменяя  $\frac{dU_H}{dt}$  и  $\frac{di_L}{dt}$ , получаем характеристическое уравнение:  
для тока

$$p^2 \times L \times C_H + p \times R \times C_H + 1 = 0; \quad (4)$$

$$\text{для напряжения} \quad L_H \times C_H \times p^2 + R_H \times C_H \times p + 1 = 0. \quad (5)$$

Корни характеристических уравнений являются комплексными.

Решением данных характеристических уравнений с учетом вида корней будут следующие выражения:

$$i_L(t) = e^{\alpha} \times \left[ \left\{ \frac{u_H(0) - i_L(0) - \alpha \times L_{50} \times i_L(0)}{\omega \times L_{50}} \right\} \times \sin(\omega_e t) + i_L(0) \times \cos(\omega_e t) \right], \quad (6)$$

$$u_H(t) = e^{at} \times \left\{ \left[ -\frac{i_{cp}}{C_H \times \omega_B} - \alpha \times u_H(0) \times C_H \right] \times \sin(\omega_B t) + u_H \cos(\omega_B t) \right\}, \quad (7)$$

где  $i_{cp}$  – ток отключаемой нагрузки в момент преждевременного погасания дуги (ток среза).

На рисунках 4–5 приведены графики, изображающие зависимости перенапряжений от длины кабеля и величины тока среза при отключении синхронного двигателя мощностью 520 кВт в режиме холостого хода. Результаты моделирования приведены в таблицах 1–2.

Таблица 1

**Зависимость коэффициента перенапряжений от полярности тока среза**

Мощность двигателя	520 кВт		1250 кВт	
Ток среза, А	5,7/-5,7	14,1	5,7/-5,7	14,1
Ун.св, кВ	9,0/10,0*	21	7,09/7,35*	13,49
$\kappa_n = \frac{U_{н.св.}}{U_\phi}$	1,83/2,06*	4,29	1,45/1,5*	2,76

\*Значение при отрицательной полярности тока среза.

Таблица 2

**Зависимость коэффициента перенапряжений от длины кабельной вставки**

Мощность электродвигателя	520 кВт			1250 кВт		
Длина кабеля, м	0	15	50	0	50	100
Ун.св, В	8968	6028	5500	6813	5839	5469
$\kappa_n = \frac{U_{н.св.}}{U_\phi}$	1,83	1,23	1,12	1,39	1,19	1,0

Из рисунков 4–7 видно, что длина кабеля между вакуумным выключателем и электродвигателем оказывает сильное влияние на амплитуду восстанавливающегося напряжения на нагрузке. С увеличением длины кабельной вставки максимальное значение напряжения уменьшается (см. рис. 4).

Это объясняется ростом эквивалентной емкости нагрузки, приводящей к снижению волнового сопротивления отключаемого контура.

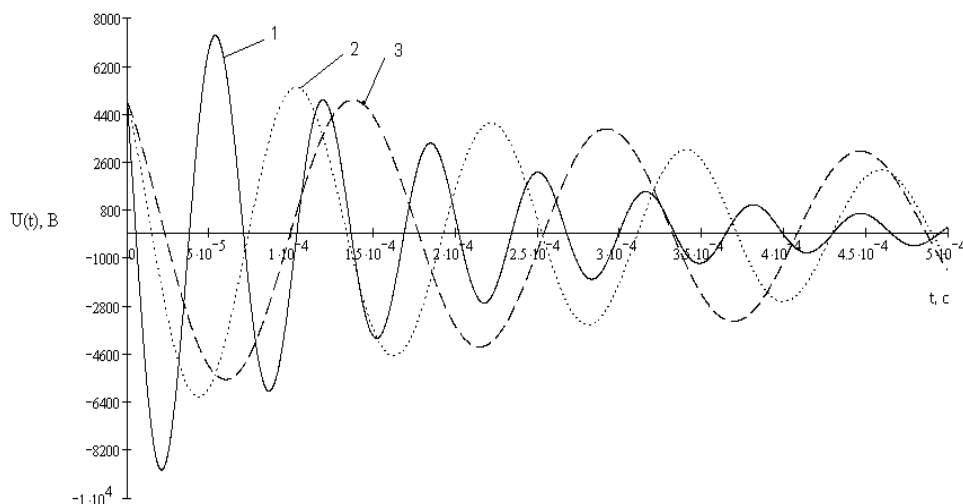


Рис. 4. Зависимость величины коммутационных перенапряжений от длины кабельной вставки:  
1 – 0 м; 2 – 50 м; 3 – 100 м. Отключение синхронного двигателя мощностью 520 кВт  
на холостом ходу. Ток среза 5,7 А

С увеличением тока среза с 5,7 до 14,1 А резко возрастает максимальная амплитуда напряжения (см. рис. 5). Время переходного процесса увеличивается. Дополнительный прирост времени обусловлен большей электромагнитной энергией в индуктивности рассеяния двигателя.

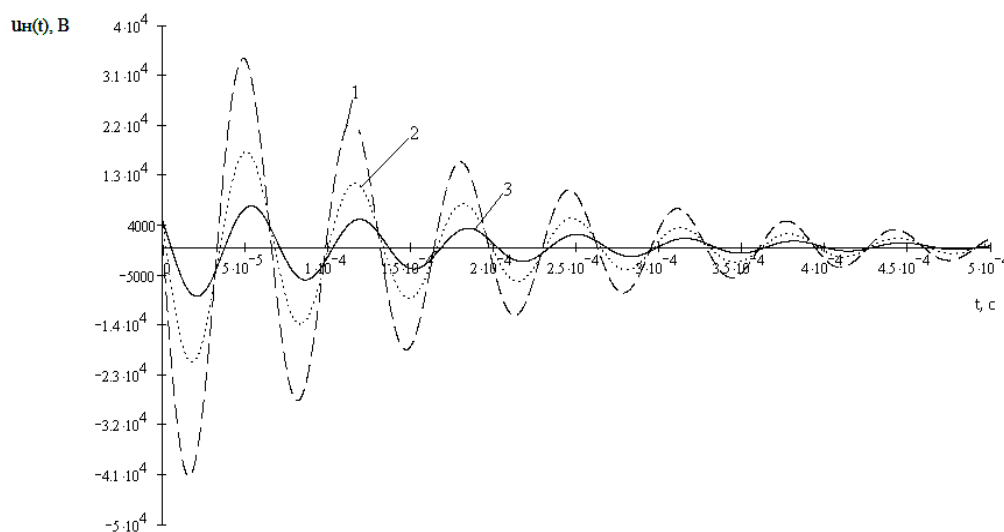


Рис. 5. Зависимость величины коммутационных перенапряжений от величины тока среза:  
1 – 5,7 А; 2 – 14 А; 3 – 28 А. Отключение синхронного двигателя мощностью 520 кВт без нагрузки.  
Длина кабельной вставки  $L_2=0$  м

На рисунке 6 показаны колебания напряжения на нагрузке в двух случаях. В первом случае, если ток оборвался на спаде положительной синусоиды тока, величина ожидаемого перенапряжения на емкости равна 9 кВ. Во втором случае дуга гаснет после перехода тока через нуль (отрицательная синусоида тока). Напряжение на емкости нагрузки в этот момент времени равно 10 кВ.

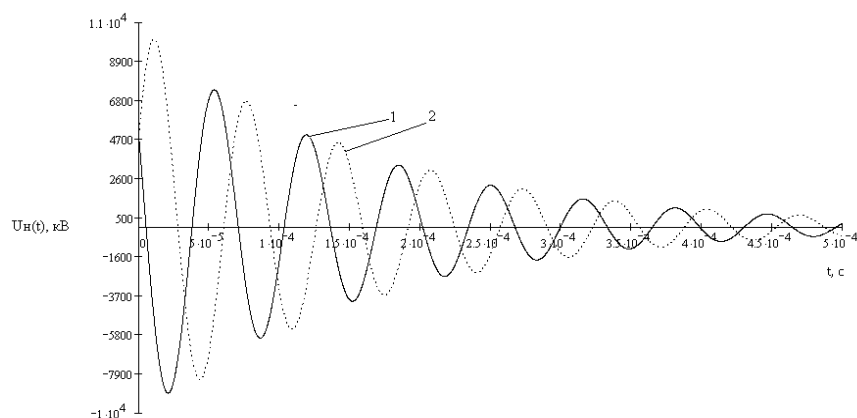


Рис. 6. Зависимость величины коммутационных перенапряжений от полярности тока среза: отключение электродвигателя мощностью 520 кВт на холостом ходу. Длина кабельной вставки 0 м; 1 – положительная полярность тока (5,7 А); 2 – отрицательная полярность тока среза (- 5,7 А)

Из сравнения переходных процессов двигателей видно, что с ростом мощности электрической машины происходит снижение уровня возникающих перенапряжений (см. рис. 4, 7). Однако с увеличением длины кабеля уровни ожидаемых перенапряжений двигателей становятся практически одинаковыми. Время протекания переходного процесса отключения значительно возрастает, так как активное сопротивление обмоток крупных двигателей значительно меньше:  $R=232$  и  $R=6,4$  Ом для двигателей мощностью 520 и 1250 кВт, соответственно, при длине кабельной вставки, равной 0 м.

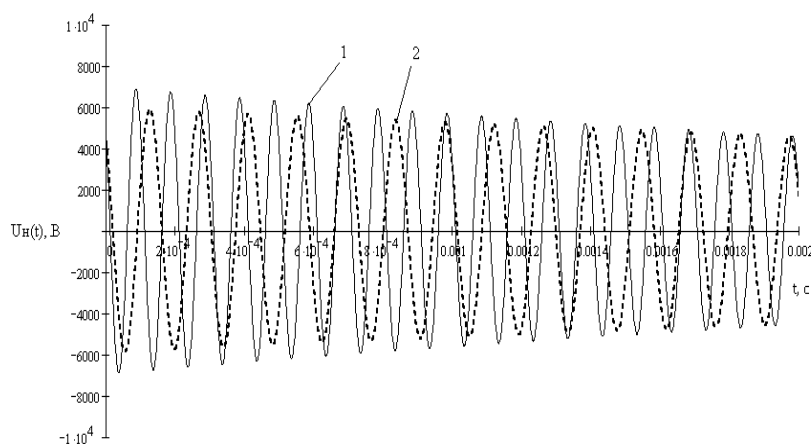


Рис. 7. Зависимость величины коммутационных перенапряжений от длины кабельной вставки: отключение электродвигателя мощностью 1250 кВт на холостом ходу. Ток среза 5,7 А; 1 – длина кабельной вставки 0 м; 2 – длина кабельной вставки 50 м

Электрическая прочность изоляции электродвигателей определяется амплитудным значением испытательного напряжения. Величина испытательного напряжения зависит от коэффициента импульса  $\text{Кимп} = U_{\text{имп.пр}} / U_{50}$  ( $U_{\text{имп.пр}}$  – амплитуда пробивного напряжения;  $U_{50}$  – пробивное напряжение промышленной частоты). В процессе эксплуатации электродвигателя происходит снижение значения данного коэффициента до 0,8–1,0 [1]. При  $\text{Кимп}=0,8$  для сетей напряжением 6 кВ импульсное пробивное напряжение будет равно  $U_{\text{имп.пр}} = \text{Кимп} \times 1,7 \times 1,4 \times U_n = 11,58$  кВ. Полученное значение пробивного напряжения является минимальным значением, характеризующим электрическую прочность ослабленных элементов изоляционных конструкций электродвигателей. Полученные в результате математического моделирования значения перенапряжений в ряде случаев превышают импульсную прочность изоляции электрических машин, что может привести к аварийному выходу из строя технологической установки. Поэтому для снижения уровня перенапряжений необходимым является применение специальных защитных устройств: нелинейных ограничителей перенапряжений ОПН- или RC-ограничителей.

Применение рассмотренной модели к анализу переходного процесса при коммутации электрической машины позволяет сделать следующие выводы:

1. При увеличении емкости нагрузки происходит значительное снижение амплитуды ожидаемого напряжения и сглаживание фронта волны импульса восстанавливающегося напряжения. Дополнительно подключенная емкость приводит к уменьшению частоты свободных колебаний, что в свою очередь приводит к снижению активного сопротивления фазной обмотки двигателя и к увеличению времени протекания переходных процессов при отключении.

2. С увеличением величины тока среза увеличиваются: амплитуда ожидаемого напряжения; первоначальная скорость изменения восстанавливающегося напряжения; длительность переходного процесса.

3. В случае, когда срез тока происходит на подъеме отрицательной синусоиды тока, амплитуды коммутационных перенапряжений возрастают по сравнению с перенапряжениями, возникающими при преждевременном обрыве тока той же величины, но противоположной полярности.

Полученные результаты моделирования коммутационных перенапряжений без учета повторных зажигания дуги можно отнести к «идеальному» выключателю, поэтому они не отражают полной картины процессов, протекающих в отключаемой нагрузке. В реальных коммутационных аппаратах процессы коммутации сопровождаются многократными повторными зажиганиями дуги. Поэтому необходимым является моделирование перенапряжений с учетом повторных зажигания дуги в выключателе.

### Литература

1. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / В.А. Воздвиженский [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
2. Кудрявцев А. Исследование аварийности в сетях 6–10 кВ горно-металлургических предприятий // Новости электротехники. – 2010. – №5.
3. Каганов З.Г. Волновые напряжения в электрических машинах. – М.: Энергия, 1970. – 209 с.



УДК 633.88:633.55

Е.Г. Худоногова, И.А. Худоногов, А.М. Худоногов

### ВЛИЯНИЕ ИНФРАКРАСНО-КОНВЕКТИВНО-ВАКУУМНОГО СПОСОБА СУШКИ НА СОДЕРЖАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЛЕКАРСТВЕННОМ РАСТИТЕЛЬНОМ СЫРЬЕ

В статье представлены результаты исследований влияния температурных режимов сушки инфракрасно-конвективно-вакуумным способом на содержание биологически активных веществ в лекарственном сырье.

**Ключевые слова:** инфракрасно-конвективно вакуумный способ сушки, лекарственное сырьё, температурный режим, биологически активные вещества.

E.G. Khudonogova, I.A. Khudonogov, A.M. Khudonogov

### EFFECT OF THE INFRARED-CONVECTIVE-VACUUM DRYING METHOD ON THE BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCE AVAILABILITY IN MEDICINAL VEGETABLE RAW MATERIAL

The research results of effect of the temperature regimes of drying by means of the infrared-convective-vacuum method on the biologically active substance availability in medicinal raw material are given in the article.

**Key words:** infrared-convective-vacuum drying method, medicinal raw material, temperature regime, biologically active substances.

**Введение.** Принцип сушки лекарственных растений основан на удалении влаги из растения. Чем быстрее производится сушка, тем выше качество сырья. При медленной сушке в клетке продолжается жизнедеятельность, и ферментативные процессы могут инактивировать биологически активные вещества.

Цель исследования – изучение влияния температурных режимов сушки инфракрасно-конвективно-вакуумным способом на содержание биологически активных веществ в лекарственном сырье. Задача исследования: проведение количественной оценки содержания биологически активных веществ в растениях до и после сушки.